Ingeniería Ambiental

Evaluación del Acueducto Quebrada Yugo de Desamparados y Diseño de un Filtro de Múltiples Etapas (FiME) para el sistema de potabilización de agua

Catalina Centeno Lizano

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Química

Ingeniería Ambiental

Evaluación del Acueducto Quebrada Yugo de Desamparados y Diseño de un Filtro de Múltiples Etapas (FiME) para el sistema de potabilización de agua

Informe de Trabajo Final de Graduación para Optar por el Grado de Licenciatura en Ingeniería Ambiental

Preparado por:

Catalina Centeno Lizano

Abril 2011

Informe presentado a la Escuela de Química

del Instituto Tecnológico de Costa Rica como requisito parcial

para optar al título de Ingeniera Ambiental con el grado en Licenciatura

Miembros del Tribunal Examinador

Ing. Jorge Calvo Gutiérrez
Director de Tesis

MSc. Ana Lorena Arias Zuñiga
Lectora

Ing. Macario Pino Gómez
Lector

"Evaluación del Acueducto Quebrada Yugo de Desamparados y Diseño de un Filtro de Múltiples Etapas (FiME) para el sistema de potabilización de agua."

Proyecto Final de Graduación -Ingeniería Ambiental- Cartago, Costa Rica. C. Centeno Lizano, 2011. catacente@gmail.com

RESUMEN

El presente proyecto de graduación, comprende la evaluación del acueducto Quebrada Yugo, además del diseño de FiME, a través de un FGDi para la planta, previos a los FLA. La evaluación toma en cuenta aspectos de diseño, eficiencia y sanitarios, al tiempo que se realizan recomendaciones. El análisis del sistema comprende desde las fuentes de agua, hasta el sistema de almacenamiento y distribución, pasando revista brevemente sobre el manejo domiciliar del agua.

Se resalta la necesidad de realizar cambios en las captaciones, desarenadores, diseño de la estructura de entrada de caudal a la planta, canaletas de filtración, tanques de almacenamiento y sistema de cloración. Con el fin que se disminuya el arrastre de sólidos y entrada de aire, se permita el control cuantitativo del afluente, se mantenga la carga hidráulica de diseño de los FLA, solucionar problemas de presión y nivel de agua y mejorar el proceso de desinfección, respectivamente. Se obtienen resultados de eficiencia remocional de CT, CF y turbiedad en cada operación unitaria del acueducto y de su conjunto, así como remoción en *Pseudomonas aeruginosa* y *Enterococcus faecalis*.

Las principales recomendaciones con respecto a la operación, el mantenimiento y control de calidad, consisten en eliminar la operación intermitente de los FLA, ampliar el control de calidad y reconstruir los lechos filtrantes. Basándose en la evaluación, y tomando los resultados de los parámetros mencionados anteriormente, se determina la idoneidad del tratamiento actual, con respecto al afluente. Obteniendo que la FLA no representa el tratamiento adecuado para el afluente recibido actualmente, comprobando la hipótesis, por lo que se proponen cambios en el diseño y en las fuentes de agua. Además de diseñar una FiME con FGDi, acorde con las características de la planta, para que éste haga las veces de barrera de protección para los FLA ante picos de turbiedad menores a 50 UNT.

Palabras clave: planta potabilizadora, acueducto Quebrada Yugo, evaluación sanitaria, operación, mantenimiento, control de calidad, Filtros Lentos de Arena, diseño Filtración Múltiples Etapas, Filtro Grueso Dinámico, cloración *in situ*.

Abstract

This graduation project includes the evaluation of the Quebrada Yugo aqueduct and the design of a MSF through a DyGF for the plant, previous to the SSF. The evaluation takes into account design, efficiency and sanitary aspects, but also gives recommendations for each of these aspects. The system was analyzed starting from the water sources to the storage and distribution system, briefly reviewing domiciliary water management. The project stresses the need for changes in water uptake, sand traps, plant entry design structure, filtration collectors, storage tanks and chlorination system. These changes seek to reduce solid and air intake to the system, allow affluent quantification control, maintain the hydraulic design load steady in the SSF, solve pressure and water level problems, and improve the disinfection process. Removal efficiency of turbidity, total and faecal coliform, was obtained in each of the aqueduct's unit operations and in a whole, in addition to the removal of *Pseudomonas aeruginosa* and *Enterococcus faecalis.*

The main recommendations for operation, maintenance and quality control consist in eliminating SSF intermittent operation, expanding quality control and reconstructing the filter beds. Based on the evaluations and taking into account the parameters mentioned before, the suitability of the treatment whit respect to the affluent, was determinate, identifying that the SSF is not an adequate treatment for the affluent that is currently being received, proving the project hypothesis. Therefore, changes are proposed in the design of the system and in the water sources, in addition to the design of a MSF with DyGF that is suit to the plant characteristics so that it can work as a protection barrier for the SSF in turbidity peaks, lowers than 50 NTU.

Keywords: Quebrada Yugo aqueduct, sanitary evaluation, operation, maintenance, quality control, Slow Sand Filtration, Multistage Filtration Design, Dynamic Gravel Filtration, *in situ* chlorination system.

Dedicatoria

A Dios, por darme la fuerza para recorrer este camino,

y a mis padres, por recorrerlo conmigo. ¡Infinitas Gracias!

Agradecimientos

Se desea agradecer profundamente a la ASADA y al personal del acueducto Quebrada Yugo, especialmente a don Heriberto Leiva. Por su gran ayuda, apoyo, carisma y por ser un trabajador realmente excepcional, constante y comprometido, al que la población del acueducto le debe el hecho de contar con agua potable, ¡gracias por su abnegada labor!

También se agradece la ayuda y soporte del CEQIATEC, que permitió llevar a cabo los análisis microbiológicos requeridos. Principalmente a la profesora Fabiola Jiménez, Alexander Marín y Yendry Tames, ¡gracias por su tiempo y paciencia!

Al profesor Eric Romero, gracias por su guía como tutor estudiantil a lo largo de la carrera universitaria. Al profesor Jorge Calvo por su labor y apoyo como tutor del proyecto de graduación. A la profesora Teresita Varela, ¡gracias por su dedicada labor como docente, sus consejos, ayuda y valor humano!

Un profundo agradecimiento a Alexa Guevara, Diana Centeno, Josué Arrieta y Maritza Lizano, ¡Sin ustedes esto no hubiera sido posible!

El agua es la esencia de la vida

Abreviaturas

ADN: ácido desoxirribonucleico.

ASADAS: Asociación Administradora De Acueductos Y Alcantarillados Rurales.

AyA: Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillado

CAARs: comités administradores de acueductos rurales.

CEQIATEC: Centro Químico de Investigación y Asistencia Técnica.

CT: coliformes totales.

CF: coliformes fecales.

DyGF: Dynamic Gravel Filtration.

ESPH: Empresa de Servicios Públicos de Heredia.

FG: filtración gruesa.

FGDi: filtro grueso dinámico.
FGDS: filtro grueso descendente en serie.
FGAC: filtro grueso ascendente en capas.
FGAS: filtro grueso ascendente en serie.
FGH: filtro grueso de flujo horizontal.

FiME: filtración de múltiples etapas.

FLA: filtración lenta en arena/filtro lento de arena.

MSF: Multistage Filtration Design.

OD: oxígeno disuelto.

OMS: Organización Mundial de la Salud

OPS: Organización Panamericana de la Salud.

pH: potencial de hidrógeno.

RANAS: Red Ambiental Nacional en Agua y Saneamiento de Costa Rica.

SAPS: Subsector Agua Potable y Saneamiento.

SSF: Slow Sand Filtration.

THM: trihalometanos.

UV: luz ultravioleta.

Simbología

": Pulgadas.

µw.s: microwatts por segundo.

ºC: grados Celsius.

cm: centímetros.

D: día.

gal: Galones.

H: hora.

Ha: hectáreas

km: kilómetros.

kPa: kilopascales.

L: litros.

Log: logaritmo.

m.c.a.: metros de columna de agua.

m: metros

Min: minutos.

ml: mililitros.

mm: milímetros.

N: tamaño de muestra.

nm: nanómetros.

NMP: número más probable.

ppm: partes por millón.

UNT: unidades nefelométricas de turbiedad.

Índice

RESUMEN 3
Abstract 4
Dedicatoria 5
Agradecimientos 6
Abreviaturas 8
Simbología 9
CAPITULO I 22
JUSTIFICACIÓN, OBJETIVOS y ALCANCES 22
1.1 Justificación 23
1.2 Objetivos 24
1.2.1 Objetivo General: 24
1.2.2 Objetivos Específicos 24
1.3 Hipótesis 25
1.4 Alcances 25
CAPITULO II 26
ASPECTOS GENERALES SOBRE PROCESOS DE POTABILIZACIÓN PARA AGUA DE CONSUMO HUMANO26
2.1 Introducción 27
2.1.1. Potabilización de agua para consumo humano 27
2.1.2. Contaminantes del agua 29
2.1.3. Desinfección 31
2.2 Procesos de tratamiento primario vinculados con un sistema de filtración lenta 33
2.2.1 Desarenadores 33
2.2.2 Filtración Lenta 33
2.2.3. FiME 38
2.3 Procesos de Desinfección Final 40
2.3.1 Propiedades del desinfectante ideal 40
2.3.2 Mecanismos de acción de los desinfectantes: 40
2.3.3 Tipos de desinfección 41
CAPITULO III 42

ANTECEDENTES DEL PROYECTO 42
3. Generalidades 43
3.1 Ubicación 43
3.2 Población abastecida por el sistema 43
3.3 Fundación del acueducto 45
3.4 Administración del Acueducto 45
3.5 Problemática 45
3.6 Sistema de potabilización: 47
3.6.1. Elementos y procesos del sistema de potabilización Quebrada Yugo. 47
3.6.2. Descripción del sistema potabilizador 49
CAPITULO IV 54
EVALUACIÓN DE LA PLANTA DEL SISTEMA DE POTABILIZACIÓN 54
4. Evaluación del sistema 55
4.1. Captación de la quebrada 55
4.2. Captación de la naciente 56
4.3. Obras de protección de las fuentes de agua 57
4.3.1. Zona de protección 57
4.3.2. Camino de acceso a las fuentes de agua 57
4.3.3. Uso de la tierra 57
4.3.4. Facilidad de acceso para extraños 58
4.3.5. Boca de inspección del sistema colector de la naciente 58
4.3.6. Protección de las aberturas 58
4.3.7. Drenaje de aguas superficiales 59
4.3.8. Eventuales focos de contaminación en los puntos de extracción 59
4.4. Desarenadores 59
4.4.1. Ubicación 59
4.4.2. Acceso 59
4.4.3. Tuberías de alimentación del desarenador 60
4.4.4. Número de unidades 60
4.4.5. Zona de entrada 60

4.4.6. Zona de sedimentación 60
4.4.7. Zona de salida 61
4.4.8. Zona de depósito y eliminación de la arena sedimentada 61
4.4.9. Protección del sistema 62
4.5. Tubería de conducción 62
4.6. Planta potabilizadora 63
4.6.1. Estructura de ingreso a la planta 63
4.6.2. Estructura de control del caudal de entrada 64
4.6.3. Filtros Lentos de Arena Paralelos 65
4.6.4 Tanque de cloración 75
4.6.5. Sistema de desinfección final 78
4.6.6. Coincidencia entre las obras existentes y los planos 83
4.7. Sistema de distribución 83
4.8. Tanques de almacenamiento 84
4.9. Manejo domiciliar del agua 85
4.10. Medidores de consumo 86
CAPÍTULO V 87
EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN, MANTENIMIENTO Y CONTROL DE CALIDAD 87
5. Evaluación de la Operación, Mantenimiento y Control de Calidad 88
5.1. Operación y Mantenimiento 88
5.2. Personal 88
5.3. Condiciones laborales 89
5.4. Tareas del personal 90
5.5. Capacitación del personal 91
5.6. Manual de operación y mantenimiento 91
5.7. Control de calidad 91
5.8. Bitácora de la planta 93
5.9. Descripción de Equipo y recursos 94
5.9.1. Instructivos de equipos 96
5.10. Mantenimiento y limpieza de equipo 96

5.10.1. Sistema de medición de turbiedad 96
5.11. Sistema Sanilec 6 Eltech 99
5.12. Mantenimiento de la tomas y red de alimentación 100
5.13. Limpieza de desarenadores 101
5.14. Planta potabilizadora 103
5.14.1. Control del afluente 103
5.14.2. Operación y mantenimiento de las válvulas y bombas del sistema 105
5.14.3. Limpieza de biofilms en las superficies del sistema 106
5.14.4. Estado de los vertederos, compuertas, tapas del tanque de contacto y llaves de paso 107
5.14.5. Filtros Lentos 107
5.15. Mantenimiento y operación de la tubería de distribución de agua potable 120
5.15.1. Tanques de almacenamiento y quiebra gradientes en la ruta de distribución 121
5.16. Lectura de medidores de consumo domiciliar e inspección de estos equipos 122
5.17 Mantenimiento de taludes en la planta 123
5.18 Concienciación de la comunidad y de la ASADA 123
5.19 Programas de protección del sistema de potabilización 124
CAPÍTULO VI 125
RESULTADO Y DISCUSIÓN 125
6.1 Condiciones de operación del proceso de FLA 128
6.1.2. Caudal de operación de la planta 128
6.1.3. Caudal de operación de los filtros 129
6.1.3. Velocidad de filtración 129
6.1.4. Pérdida de carga 129
6.1.5. Temperatura 130
6.1.6. Oxígeno Disuelto 131
6.1.7. Periodo de maduración 131
6.1.8. Características del schmutzdecke o capa biológica 133
6.1.9. Carrera de filtración 135
6.1.10. Características del medio filtrante 135
6.2 Eficiencia de la desinfección 141

6.2.1. Determinación de los factores que inciden sobre la eficiencia de la desinfección 141
6.2.1.3. Características del sistema de desinfección..... 145
6.3 Eficiencia global del tratamiento potabilizador 148
6.3.3 Calidad microbiológica 152
6.1. Idoneidad del Tratamiento de FLA con respecto al agua cruda actual..... 157
6.4.1. Problemática desencadenada por la frecuente alza de los valores de turbiedad en el agua cruda..... 160
6.4.2 Causas de la problemática relacionada con la alta turbiedad del afluente y soluciones 162
CAPÍTULO VII 167
DISEÑO DEL FILTRO GRUESO DINÁMICO 167
7.1. Elementos de un FGDi 168
7.2. Procedimiento de diseño 168
7.3. Diseño de FGDi para la planta potabilizadora Quebrada Yugo..... 169
7.3.1. Proceso de diseño de FGDi para la planta de Quebrada Yugo 169
7.3.2. Valores de los principales parámetros obtenidos..... 169
7.3.3 Planos del FGDi 170
CAPÍTULO VIII 177
CONCLUSIONES 177
8. Conclusiones y Resumen de Recomendaciones 178
8.1. Obras de Captación 178
8.2. Tubería de alimentación a los desarenadores 178
8.3. Desarenadores 179
8.4. Cámara de entrada de caudal a la planta 179
8.5. Colmatación de los FLA 179
8.6. Cambios en las estructuras de las canaletas de los FLA..... 179
8.7. Trampas de arena..... 180
8.8. Velocidad de filtración 180
8.9. Carga hidráulica de los FLA 180
8.10. Nivel del sobrenadante 181
8.11. Reconstrucción del lecho filtrante 181
8.12. Niveles de OD 181

8.13. Características del schmutzdecke 181
8.14. Carreras de filtración 182
8.15. Proceso de desinfección con cloro 182
8.16. Turbiedad 182
8.17. Eficiencia microbiológica 183
8.18. Limpieza de superficies internas de las estructuras 185
8.19. Recomendaciones sobre la limpieza de los FLA 185
8.20. Problemática relacionada al aumento de turbiedad y soluciones 186
8.21. Cambios en las condiciones laborales del personal 188
8.22. Concienciación de la población abastecida 189
8.23. Programas de protección de fuentes 189
Bibliografía 190
Anexo 1 195
Filtros gruesos 195
Anexo 2 200
Tipos de desinfección y microorganismos indicadores 200
Anexo 3 218
Situación de las ASADAS en Costa Rica 218
Anexo 4 223
Parámetros y fórmulas de diseño de un sistema de FGDi 223
Anexo 5 230
Proceso de diseño de FGDi para la planta potabilizadora Quebrada Yugo 230
Anexo 6 236
Filtración Dinámica 236
OPS, CEPIS, 2003. 236
Manual de Operación y Mantenimiento del FGDi 236
Anexo 7 240
Anexo Fotográfico 240

Índice de Cuadros

Cuadro 5.1. Análisis de control de calidad del sistema de potabilización Quebrada Yugo. 93

Cuadro 6.1. Resumen de análisis realizados en la evaluación del acueducto Quebrada Yugo. 127

Cuadro 6.2. Determinación del oxígeno disuelto en la planta potabilizadora Quebrada Yugo. 131

Cuadro 6.3. Determinación del pH en el proceso de filtración al finalizar la carrera de filtración. 132

Cuadro 6.4. Determinación de CT y CF para la arena limpia y la capa biológica del FLA 1..... 134

Cuadro 6.5. Altura del lecho y del estrato de arena del FLA 1, en el acueducto Quebrada Yugo. . 138

Cuadro 6.6. Contenido de sedimento en el filtro lento uno, del acueducto Quebrada Yugo. 140

Cuadro 6.7. Relación del pH y la temperatura en la concentración de HClO (%). 143

Cuadro 6.8. Determinación de cloro residual libre en el sistema de distribución..... 148

Cuadro 6.9. Registro de turbiedad del afluente a la planta Quebrada Yugo, durante el segundo semestre del 2010, en días carentes de precipitación húmeda. 151

Cuadro 6.10. Determinación de coliformes totales, por el método de NMP en el acueducto Quebrada Yugo..... 153

Cuadro 6.11. Determinación de coliformes fecales, por el método de NMP en el acueducto Quebrada Yugo..... 153

Cuadro 6.12. Eficiencia de remoción global y de las operaciones unitarias de potabilización del acueducto Quebrada Yugo..... 155

Cuadro 6.13. Análisis de *Pseudomonas aeruginosa y Enterococcus faecalis*, en el afluente y efluente del acueducto Quebrada Yugo..... 156

Cuadro 6.14. Registro de picos de turbiedad (≥ 500 UNT) del afluente a la planta Quebrada Yugo, durante el segundo semestre del 2010. 159

Cuadro 6.15. Resumen de rangos de calidad de agua en fuentes superficiales para orientar la selección de opciones de FiME (CEPIS, 2005). 164

Cuadro 6.16. Modelo para la selección de un sistema de tratamiento de agua por filtración en múltiples etapas, FiME. (Todas las opciones incluyen FGDi 2.0 y FLA0.15)..... 165

Cuadro 6.17. Valores guía sobre la calidad del agua para elegir un FGDi (Cepis 2003)..... 166

Cuadro 7.1. Resumen de principales parámetros de diseño para FGDi (Cepis, 2005). 168

Cuadro 7.2. Principales resultados del diseño del FGDi para la planta potabilizadora de La Sierra.170

Cuadro A.1.1. Costos directos de construcción estimados (miles de USD). 196

Cuadro A.1.2. Granulometría y Espesor De Capas para FGA. 198

Cuadro A.2.1. Comparación de los principales métodos de desinfección de agua para consumo humano. 213

Cuadro A3.1. Población abastecida con agua clorada y no clorada por ente operador, para el año 2002 220

Cuadro A.3.2 Total de sistemas según ente operador para el año 2002. 220

Cuadro A3.3. Cobertura de agua potable en función del ente operador (2006-2009) 221

Cuadro A.4.1 Características del lecho filtrante de un FGDi 224

Cuadro A.4.2. Características del lecho de soporte de un FGDi 224

Cuadro A.4.3. Parámetros de diseño para la tubería de drenaje. 225

Cuadro A.4.4.Coeficiente de pérdida (k) de cada accesorio. 229

Cuadro A.5.1. Proceso de diseño del FGDi para la planta potabilizadora de Quebrada Yugo 230

Índice de Figuras

Figura 2.1. Detalle de un filtro lento. 33

Figura 2.2. Detalle de un filtro lento con nivel constante del sobrenadante y variable en la cámara colectora de agua filtrada. 36

Figura 2.3. Corte longitudinal de un filtro lento con nivel variable del sobrenadante y constante en la cámara colectora de agua filtrada. 36

Figura 2.4. Esquema general de una planta de tratamiento de agua por Filtración en Múltiples Etapas. 39

Figura 3.1. Mapa de la ubicación del acueducto Quebrada Yugo, su fuente principal y los poblados abastecidos. 44

Figura 3.2. Proceso de potabilización de la planta Quebrada El Yugo. 48

Figura 4.1. Elementos básicos en la captación de fuentes subterráneas del tipo manantial. 56

Figura 4.2. Esquema básico de un FLA. 66

Figura 4.3. Estructura de un difusor en una tubería y en un canal, respectivamente. 79

Figura 4.4. Los elementos esenciales en un tanque de almacenamiento de agua potable 85

Figura 5.1. Esquema equipo automático de medición de turbiedad y detalle de los componentes del sensor de la celda de flujo. 98

Figura 5.2. Pasos básicos de la producción de cloro *in situ*. 119

Figura 6.1. Comportamiento de la pérdida de carga a lo largo de la carrera filtrante. 130

Figura 7.1. Programa utilizado para desarrollar el proceso de diseño de la FGDi. 169

Figura 7.2. Vista principal del FGDi diseñado para el acueducto Quebrada Yugo. 171

Figura 7.3. Corte A-A` del FGDi diseñado para el acueducto Quebrada Yugo. 172

Figura 7.4. Corte B-B` del FGDi diseñado para el acueducto Quebrada Yugo. 173

Figura 7.5. Corte C-C` del FGDi diseñado para el acueducto Quebrada Yugo. 174

Figura 7.6. Corte D-D` del FGDi diseñado para el acueducto Quebrada Yugo. 175

Figura 7.7. Corte E-E` del FGDi diseñado para el acueducto Quebrada Yugo. 176

Figura A.1.1. Esquema de un Filtro Grueso Dinámico. 196

Figura A.1.2. Esquema de un Filtro Grueso Descendente en Serie. 197

Figura A.1.3. Esquema de un Filtro Grueso Ascendente en Serie. 197

Figura A.1.4. Esquema de un Filtro Grueso Ascendente en Capas. 197

Figura A.1.4. Esquema de un Filtro Grueso de Flujo Horizontal. 198

Figura A.2.1. Evolución de la cantidad de cloro residual en función de la cantidad de cloro introducido. 209

Figura A.2.2. Distribución del ácido hipocloroso y del ión hipoclorito en agua para diferentes valores de pH 211

Figura A.3.1. Población total del país por ente operador al 2002. 219

Figuras A.7.1 y A.7.2. Quebrada El Yugo en época seca (izq) y en época lluviosa (der). 240

Figura. A.7.3. Toma de la quebrada El Yugo. 240

Figura A.7.4. Entrada a la captación de la naciente 240

Figura A.7.5. Inmediaciones de la captación de la naciente. 240

Figuras A.7.6 a A.7.9. Captación de la naciente y barrera de seguridad..... 241

Figuras A.7.10 a A.7.12. Puente hacia los desarenadores; alrededores de los desarenadores (río a la der) y Cámara de entrada y zonas de sedimentación paralelas. 241

Figura A.7.13. Tubería original (izq) y tubería actual (der). 242

Figura A.7.14. Rejillas en las zonas de sedimentación. 242

Figura A.7.15. Compuerta de desarenadores. 242

Figura A.7.15.Zona de salida de los desarenadores..... 242

Figura A.7.16.Rejillas y tubería de salida de los desarenadores. 242

Figura A.7.17. Fondo de los desarenadores..... 243

Figura A.7.18. Tubería de conducción..... 243

Figura A.7.19.Conexión con codo en la tubería de conducción..... 243

Figuras A.7.20 y A.7.21.Tubería de caudal de entrada a la planta y válvula de regulación manual de caudal y detalle de la figura anterior: tubería izquierda gris transporta el caudal de alimentación del sistema de medición de turbiedad, tubería central de alimentación principal, tubería plateada derecha alimenta el área de lavado de arena..... 243

Figura A.7.22. Entrada del agua al sifón..... 244

Figura A.7.23. Lector automático de turbiedad alimentado por el efluente del sifón. 244

Figuras A.7.24 y A.7.25. Panel de control del sistema de entrada del caudal a la planta y batería de suministro eléctrico..... 244

Figura A.7.26. Pantalla digital de la lectura de turbiedad..... 245

Figura A.7.27. Válvula automática de control de alimentación a la planta. 245

A.7.28. Control del modo de operación y de las válvulas automáticas. 245

Figura A.7.27. Panel de control del estado o situación de las válvulas automáticas del sistema. . 245

Figura A.7.28. Válvulas manuales. 245
Figura A.7.29. Tapas del sistema de válvulas. 246
Figura A.7.30. Cámara de entrada y vertedero. 246
Figura A.7.31. Entrada caudal a la FLA. 246
Figura A.7.32. Entrada del afluente y alimentación a los FLA. 246
Figura A.7.33. Cierre de compuerta del FLA. 246
Figura A.7.34. Solera a la entrada de los FLA. 246
Figura A.7.35. Sistema paralelo de filtración lenta. 247
Figuras A.7.35 y A.7.36. Salidas del caudal de rebose (1 y 2), Salida superficial para la limpieza (3).247
Figuras A.7.37. Descarte de aguas (salidas 1,2 y 3 fig.ant). 247
Figura A.7.38. Área de lavado de arena. 247
Figura A.7.39. Canaletas colectoras de agua filtrada. 247
Figura A.7.40 Casetilla de cloración y tanque de contacto. 248
Figuras A.7.41 a A.7.43. Panel de control de cloración por electrólisis, electrodo y estañones con disolución de cloro. 248
Figura A.7.44. Sistema de dosificación de cloro. 248
Figura A.7.45. Instalación eléctrica en la casetilla de cloración. 248
Figura A.7.46. Afluente del tanque de contacto. 248
Figura A.7.47. Tapa del acceso al tanque de cloración y detalle. 249
Figuras A.7.48 a A.7.51. Tanques de almacenamiento a lo largo del sistema de distribución.....249
Figura A.7.52. Casa de reuniones y bodega. 250
Figura A.7.53. Fenómeno “bloom” en los FLA. 250
Figura A.7.56. Nuevos tanques de almacenamiento. 250
Figura A.7.57. Kit HACH para determinar cloro libre y total. 251
Figura A.7.58. Turbidímetro de columna Kit OXFAM DELAGUA. 251
Figura A.7.59. Medidor de pH OAKTON. 251
Figura A.7.60. Panel de control del nuevo sistema de cloración in situ Easy Clor 251
Figura A.7.61. Tanques nuevos para la preparación de disolución de cloro. 251
Figura A.7.62. Sistema de tuberías de salida y punto de dosificación en el tanque de cloración. . 251
Figura A.7.63. Bomba dosificadora de cloro 252
Figura A.7.64. Tubo - (izq) y + (der) para el grupo coliforme. 252

Figura A.7.65. Pseudomonas y Enterococos. 252

Figura A.7.66 a A.7.71. Tanques de almacenamiento de agua domiciliar en condiciones no sanitarias 252

Figuras A.7.72 a A.7.76. Limpieza del desarenador. 253

Figuras A.7.77 a A.7.80. Crecimiento de algas y biopelículas sobre el vertedero y en las cámaras de entrada de fluído a la planta y a los FLA. 253

Figuras A.7.81 y A.7.82. Desagüe y musgo en el área de lavado de arena. 254

Figura A.7.83.Sistema en paro por alta turbiedad. 254

Figura A.7.84. Material sobrenadante. 254

Figuras A.7.85 a A.7.89. Proceso de limpieza de los FLA: filtro en proceso de vaciado; remoción de la capa biológica; rearenado, distribución de la arena y emparejado de la superficie del FLA..... 254

Figura A.7.90. Biofilm sobre las paredes de la canaleta. 255

Figura A.7.91. Lavado de la canaleta colectora de agua filtrada. 255

Figura A.7.92. Canaleta limpia. 255

Figura A.7.93. Desacomodo de arena por llenado inadecuado. 255

Figura A.7.94. Llave de paso corroída. 255

Figura A.7.95. Llaves de medidores de consumo domiciliar 255

Figuras A.7.96 y A.7.97. Agua y tierra que obstaculizan la lectura de los medidores. 256

Figura A.7.98. Lectura de un medidor instalado en alto. 256

Figuras A.7.99 y A.7.100. Maleza sobre medidores de consumo. 256

Figuras A.7.101 y A.7.102. Hormiguero y araña en los medidores. 257

Figura A.7.103. Desprendimiento de taludes en la planta potabilizadora. 257

CAPITULO I

JUSTIFICACIÓN, OBJETIVOS y ALCANCES

CAPITULO I

JUSTIFICACIÓN, OBJETIVOS Y ALCANCES

1.1 Justificación

La ASADA de Quebrada Yugo posee un sistema de potabilización de agua constituido por dos unidades en paralelo de filtración lenta y cloración por electrólisis. Los FLA reducen los valores de turbiedad, coliformes totales y sólidos en el agua, sin embargo sólo realizan esta función eficientemente cuando el agua cruda presenta valores de turbiedad por debajo de 10 UNT. Ya que los filtros tienden a saturarse, lo que provoca el colapso del sistema y del proceso de potabilización cuando se presentan valores mayores.

Actualmente en la planta de agua potable, los valores de turbiedad del agua captada, han incrementado notablemente hasta alcanzar 1000 UNT. Además se realiza un somero control de la calidad del agua -tanto de la entrada como de la salida del sistema-, de las características y ciclos de variación del caudal y su impacto sobre el tratamiento. Aunada la condición empírica de la operación y mantenimiento del sistema. Por esta razón se han desencadenado serias consecuencias, como lo son: la saturación de los FLA, paro de la planta, disminución de la cantidad de agua tratada y de su calidad, y el no abastecimiento momentáneo de la población.

La FiME combina la FG con la FLA. La primera es utilizada para tratar aguas con alta turbiedad, y obtener en promedio un efluente con turbiedad menor de 10 a 20 UNT, con el fin de facilitar el proceso de tratamiento en las unidades FLA e incrementar la eficiencia y el tiempo de operación de estas últimas unidades de tratamiento.

Es por esto que el objetivo general del proyecto se encuentra dirigido al diseño de un sistema FiME, con FGDi que mejore la calidad y el suministro de agua, que recibe la población dependiente del acueducto.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General:

1.2.1.1. Diseñar un sistema FiME, para la planta de potabilización de agua Quebrada Yugo de Desamparados, con el fin de mejorar la calidad del agua producida por esta planta.

Con el proyecto se busca diseñar un sistema FiME, que incluya un tratamiento de FGDi, seguido de la FLA. Primeramente se evalua el acueducto y se establecen mejoras o recomendaciones en cuanto a diseño, operación, mantenimiento y eficiencia del proceso de potabilización, enfocado a la filtración lenta y cloración, con los que cuenta actualmente la planta Quebrada Yugo. Realizado esto se procede a diseñar un FGDi, acorde con las características del agua cruda de la planta, con el fin que la ASADA lo implemente, como barrera ante incrementos de turbiedad y así disminuirla, evitando la saturación de los FLA y aumentando la cantidad y calidad del agua tratada.

1.2.2 Objetivos Específicos

1.2.2.1 Evaluar el acueducto, enfocado a los FLA y sistema de cloración, como partes integrales del sistema FiME y establecer las mejoras del mantenimiento, operación y control de calidad.

1.2.2.2 Diseñar el sistema de FGDi, como etapa primaria de la FiME y pre-tratamiento a los FLA.

De acuerdo al primer objetivo específico se realiza una evaluación global del sistema y de cada uno de sus componentes. De manera tal que se inspecciona la fuente de agua, la obra de captación, la infraestructura de tratamiento, incluyendo los filtros, sistema de cloración, tanque de contacto, y la labor del operador.

Asimismo se lleva a cabo una evaluación de la eficiencia, operación y mantenimiento del sistema FLA actual, siguiendo la metodología de CEPIS y la OMS para la evaluación de Filtros Lentos (CEPIS, 1992). Se caracterizarán las aguas crudas, así como del efluente de los FLA y del sistema de cloración en turbiedad, CT y CF.

Se evalúa además la infraestructura del sistema y funcionamiento del sistema de cloración, y comportamiento del cloro residual. Finalmente se establece la eficiencia de las unidades FLA, y del sistema de cloración, en cuanto a la disminución de los valores de los parámetros de turbiedad y coliformes. Aunado a esto se evalúan los procedimientos actuales de mantenimiento, operación y control de calidad, al tiempo que se realizan recomendaciones. Como parte importante de la evaluación se identifican las opciones de mejora en operación y mantenimiento.

Con el segundo objetivo específico se persigue realizar el diseño de un FGDi, como tratamiento primario en la FiME, seguido de los FLA.

1.3 Hipótesis

La ASADA de Quebrada Yugo posee un diseño del sistema potabilizador inadecuado para las características del agua cruda.

1.4 Alcances

Este proyecto circunscribe sus alcances a la evaluación del sistema potabilizador de Quebrada Yugo en los aspectos de:

a. Inspección de las estructuras del sistema de potabilización, enfocado a la existencia y estado de sus componentes esenciales.
b. Calidad del agua determinados por características microbiológicas, de acuerdo a presencia/ausencia de CT y CF, y a características fisicoquímicas, limitadas a los niveles de turbiedad y cloro residual libre en el agua.
c. Operación y mantenimiento del sistema potabilizador.

Con base en esta evaluación se establece:

a. Idoneidad del diseño con respecto a las aguas captadas por el sistema en cuanto a niveles de turbiedad.
b. Diseño de una FiME, a través de la FGDi para el sistema potabilizador de Quebrada Yugo.

CAPITULO II

ASPECTOS GENERALES SOBRE PROCESOS DE POTABILIZACIÓN PARA AGUA DE CONSUMO HUMANO

CAPITULO II

ASPECTOS GENERALES SOBRE PROCESOS DE TRATAMIENTO PARA LA POTABILIZACIÓN DE AGUA DE CONSUMO HUMANO

2.1 Introducción

2.1.1. Potabilización de agua para consumo humano

La vida en el planeta tal y cómo es actualmente se debe en gran parte a una de sus fuentes principales, el agua. Su presencia permite el desarrollo de seres a lo largo de toda la Tierra. El agua es una de las sustancias más interesantes que existen en la tierra, sus peculiares características le permiten ser el disolvente universal. La vida en cualquiera de sus formas es completamente dependiente de ella, su disponibilidad determina el modo de vida del ser humano, y afecta el tipo de flora y fauna que se pueda encontrar en un lugar.

El agua es necesaria para el adecuado funcionamiento de los sistemas corporales de todos los seres vivos, constituye del 50 al 90% de la masa de los organismos, y es parte indispensable de la sangre, la savia, y del protoplasma, -materia básica de las células-. El agua es un vehículo de trasporte para sustancias requeridas en procesos metabólicos, al actuar como disolvente, además de combinar y descomponer químicamente diversos compuestos. La hidrólisis permite la descomposición metabólica de moléculas tan esenciales como las proteínas y los carbohidratos.

El ser humano a través de la historia se ha desarrollado y establecido alrededor de fuentes de agua, ya que es de vital importancia para todas sus actividades, desde las más cotidianas hasta actividades económicas, sin importar la cultura. Alrededor del agua se desarrollan las actividades sociales, culturales, y económicas, de un pueblo, de una nación, ya que este líquido es parte esencial de procesos industriales, de la agricultura, en el mantenimiento de ecosistemas, y en fin, de las actividades cotidianas, que definen al ser humano.

Lo anterior pone en evidencia y establece una verdad irrefutable: La vida depende del agua. El acceso al agua potable es fundamental para la salud, es uno de los derechos humanos básicos y un componente de las políticas eficaces de protección de la salud (OMS, 2006). Su eficiente distribución y calidad determinan a su vez la calidad de vida del ser humano, por ello, es necesario regular estos aspectos.

De acuerdo con la OMS y UNICEF (2010), cada día muere en promedio 4.500 niños menores de cinco años en todo el mundo por falta de acceso al agua potable y saneamiento básico, 1.5 millones al año. En el 2005 el 73% de la población mundial, poseía acceso al agua potable, y para el 2010, ese valor subió en 14 puntos porcentuales, un 87%. Aún así, en el mundo todavía existen 882 millones de personas que no gozan de fuentes de abastecimiento de agua potable, no cuentan con agua canalizada en sus casas, ni fuentes cercanas o pozos con agua potable en sus poblaciones o al menos un sistema de recogida y purificación del agua de lluvia.

Así como la característica de disolvente universal del agua, supone grandes ventajas, también acarrea serias consecuencias, debido a que puede ser un vehículo de trasporte de miles de sustancias dañinas, que entran hasta al organismo, por la ruta de ingestión, principalmente. Es por esto que el acceso y desinfección de este líquido debe ser fundamental para la salud pública, pues de efectuarse de manera fiable, reduce la incidencia de la mayor parte de las enfermedades transmitidas por el agua (Otterstetter, H. Zepeda, F. 1996).

Uno de los principales objetivos que se debe seguir antes de la desinfección, consiste en la protección de las fuentes de abastecimiento de agua para uso y consumo humano (Garcia, J et. al. 2002). Esto se realiza con mucha más razón en la actualidad. Tanto por el constante deterioro ambiental como por la contaminación del agua. Esta última ha ocasionado la mayor destrucción del recurso hídrico, por efectos del ser humano y su incorrecta planeación de crecimiento poblacional.

Para determinar la potabilización adecuada del agua, existen parámetros internacionales, dados por la OMS, como nacionales, establecidos por las entidades de salud de cada país. En Costa Rica rige el Reglamento para la Calidad del Agua Potable (Decreto Nº 32327-S), en el cual se define el agua potable como *"toda agua que, empleada para la ingesta humana, no causa daño a la salud y cumple con las disposiciones de valores recomendables o máximos admisibles estéticos, organolépticos, físicos, químicos, biológicos y microbiológicos"* establecidos por dicho reglamento.

2.1.2. Contaminantes del agua

2.1.2.1. Contaminantes Microbiológicos

La naturaleza posee una variadísima gama de microorganismos, y el mundo entero se encuentra gobernado por ellos, los cuales forman parte del desarrollo y equilibrio en los ecosistemas, sus interrelaciones y peculiaridades. Todos ellos aprovechan los nutrientes y las condiciones ambientales de sus alrededores para sobrevivir.

El agua es uno de los medios más importantes para la expansión de los microorganismos. Diferentes microorganismos pueden colonizar el líquido y comenzar su florecimiento, muchos de ellos altamente peligrosos para la salud humana, por lo que cobran aún más relevancia en el agua de consumo. Por lo que es imperante el control de microorganismos dañinos en el recurso hídrico.

Dentro de los microorganismos dañinos para la salud se encuentran los protozoarios, transmitidos por excretas humanas o animales, como la *Giardia intestinalis*, *E. histolytica y Cryptosporidium*, y las bacterias *Salmonella spp*, *Shiguella*, *E. coli patógena*, *Vibrio Cholerae*, *Leptospira interrogans*, cianobacterias, entre otras.

También son microorganismos molestos en el agua potable, las bacterias llamadas comúnmente como bacterias del hierro y del azufre, puesto que causan corrosión galvánica, generando problemas en los sistemas de tuberías en los acueductos, y además forman depósitos que le aportan color y olor desagradables al agua.

Además el agua puede trasmitir virus, como enterovirus, hepatovirus, rotavirus, calicivirus, adenovirus y astrovirus. Otros organismos que pueden estar presentes en el agua, y que son trasmisores de enfermedades son los helmintos, grupo que incluye cestodos, trematodos y nematodos. Cobran importancia aquellos cuya ruta de trasmisión la constituye la fecal-oral.

2.1.2.2. Contaminantes químicos

Los riesgos para la salud asociados a los componentes químicos del agua de consumo, se deben principalmente a su capacidad de bioacumularse y producir efectos crónicos adversos sobre la salud, es decir tras periodos de exposición prolongados.

Aunque las concentraciones de las sustancias o compuestos, sean bajas, o se encuentren por debajo de los niveles establecidos por la legislación respectiva -en caso que esta exista-, no dejan de tener relevancia, debido a que el consumo diario de agua, supone una ingestión frecuente de las sustancias presentes en ella. Esto provoca un aumento de concentración en el cuerpo, a través del tiempo, ya que no son desechadas tan fácilmente, como si lo es el agua por medio de la orina. Esto representa un grave peligro muchas veces silenciado, y no solo es riesgoso como agua de bebida, sino como componente esencial de las labores cotidianas, como medio de cocción de alimentos, aseo personal, entre otras.

Entre los compuestos más encontrados en aguas, se encuentran los nitratos y nitritos, provenientes de la aplicación excesiva de fertilizantes o a la filtración de aguas residuales u otros residuos orgánicos a las aguas subterráneas. Los nitritos, provocan metahemoglobinemia, principalmente en niños, condición conocida como el Síndrome del niño azul.

La exposición a concentraciones elevadas de fluoruro, de origen natural, genera problemas dentales, y en casos graves, fluorosis ósea incapacitante. El arsénico también puede llegar al agua de forma natural, y sus efectos son bien conocidos y documentados, ya que ocasiona lesiones cutáneas graves, y eleva el riesgo significativamente de sufrir cáncer.

2.1.2.3. Contaminantes físicos y organolépticos

Ciertas características físicas del agua, pueden interferir en la calidad requerida para ser considerada apta para el consumo humano. Dentro de estos se encuentran las características organolépticas como el sabor, el olor, y el color, asociadas a los contaminantes químicos y microbiológicos. Estas deben ser de tal modo, que el consumidor no perciba como desagradable el agua, ya que de otro modo, no sería ingerida.

También afectan algunas características físicas como las partículas suspendidas o sedimentables, y la turbiedad. A la vez que son desagradables para el consumidor, pueden significar la presencia de contaminación microbiana especialmente, ya que las partículas constituyen un buen lugar de asilo, para que las bacterias evadan los efectos del desinfectante. Asimismo la temperatura del agua debe encontrarse entre 18 y 30 ºC, para que sea agradable al gusto, y también para que permita el avance de reacciones químicas, y no interfiera negativamente en los procesos de desinfección.

2.1.3. Desinfección

El agua de consumo es una vía de entrada crítica de los microorganismos y sustancias químicas al cuerpo, por medio de la ingestión, y al ser este líquido tan necesario para la supervivencia y el desarrollo del ser humano, supone una ingestión frecuente y sostenida de los contaminantes presentes en él. Por tanto, resulta casi imposible impedir y controlar la propagación de las enfermedades que pueden trasmitirse a través de este líquido, sin una desinfección confiable de las fuentes de agua comunitarias (Reiff, F. 1996).

La contaminación del recurso hídrico representa un gran impacto sobre la salud poblacional mediante el agua de bebida. Su contaminación puede ser puntual o no, sean aguas residuales, escorrentía pluvial, agua de retorno del riego agrícola o desperdicios del procesamiento de alimentos. De igual manera, las fuentes de agua se contaminan por desechos de origen animal y humano, que aportan agentes patógenos de transmisión hídrica. (Geldreich, E. Craun, G. 1996)

Debido a las serias y graves consecuencias de la contaminación hídrica, es que el tratamiento es un asunto de salud pública, que busca evitar problemas salubres en la población, aumentar la calidad de vida y disminuir costos de atención médica, de los problemas generados por agua utilizada para el consumo y que no es apta para ello.

A lo largo de los años, se han ideado diferentes técnicas que en conjunto constituyen el proceso de desinfección, cuyo fin es el minimizar los contaminantes biológicos, físicos y químicos del agua, para que una determinada fuente de agua, sea idónea para el consumo humano. La desinfección refiere entonces, el tratamiento aplicado prioritariamente cuando el agua se encuentra contaminada, o cuando no puede garantizarse su potabilidad natural de forma permanente (OPS, 1999). Este proceso implica la eliminación o inactivación de organismos molestos, patógenos, además del tratamiento de algunos metales. Con ella se ha logrado disminuir los peligros en la salud ocasionados por ellos, ya que es una protección contra el riesgo de enfermedades transmitidas mediante este líquido vital.

Desinfectar las fuentes de abastecimiento de agua potable representa una medida de salud pública necesaria, mas no implica esterilidad, es decir, la destrucción de la totalidad de organismos presentes en ella. Posee una eficiencia del alrededor de un 95% de remoción, suficiente en términos prácticos, para garantizar la salud.

El tratamiento de potabilización incluye procesos primarios, dentro de los que se encuentra el cribado y los desarenadores; y secundarios como floculación, sedimentación, y filtración. La desinfección final constituye la aplicación de un agente biocida, de preferencia con acción residual. Estos tratamientos primarios y secundarios son requeridos para eliminar partículas, reducir la turbiedad para clarificar el agua, disminuir y eliminar agentes patógenos resistentes a procesos de desinfección y permitir que el desinfectante actúe eficientemente. (Otterstetter, H. Zepeda, F. 1996).

2.2 Procesos de tratamiento primario vinculados con un sistema de filtración lenta

2.2.1 Desarenadores

Los desarenadores permiten separar la arena y partículas en suspensión gruesa del agua cruda, evitando su paso y depósitos en las obras de conducción, además de proteger las bombas de la abrasión y evitar altos niveles de sólidos o sobrecargas, en los procesos posteriores de tratamiento. El desarenado remueve las partículas superiores a 0,2 mm. (OPS y CEPIS, 2005)

2.2.2 Filtración Lenta

Los FL constituyen uno de los métodos más económico y eficiente. Reina como el proceso más sencillo y económico que puede mejorar la calidad física, química y bacteriológica de aguas superficiales con bajas concentraciones de turbiedad y color. (EnoHSa, 2007)

En el filtro lento convencional, el agua desciende a través de un manto de arena graduada apoyado sobre un manto de grava, para ser recogida en la parte inferior de la caja filtrante mediante un sistema de drenaje. El material retenido es almacenado en la capa superior del manto de arena (Figura 2.1). Esta capa superior debe ser removida o rastrillada periódicamente, con el fin que la capacidad de carga no se vea reducida perjudicialmente. (EnoHSa, 2007)

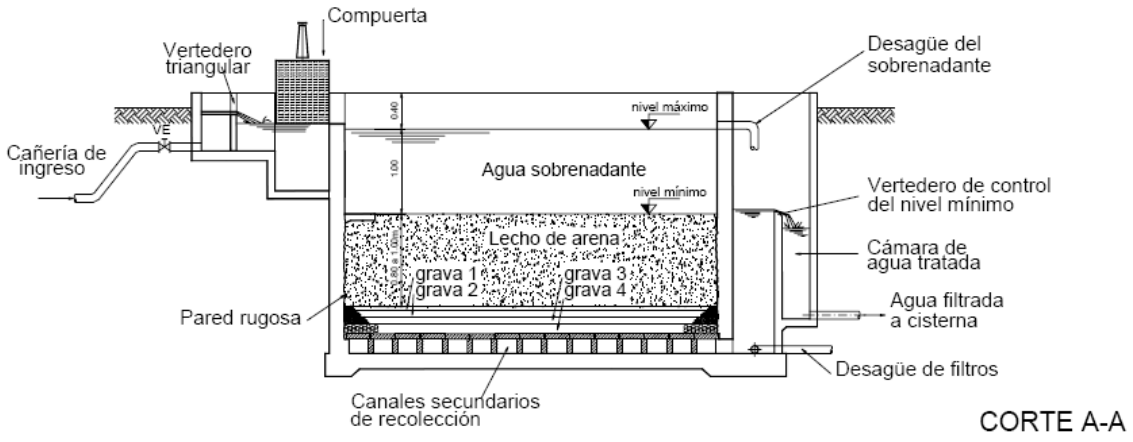


Figura 2.1. Detalle de un filtro lento. (EnoHSa, 2007)

El sistema de drenaje consiste de una tubería principal con conductos laterales, que pueden construirse a partir de tuberías perforadas, ladrillos o losas perforadas, que se cubre con una capa de grava y una de arena. El uso de tuberías corrugadas ha sido promovido por CINARA y ha permitido una reducción en la altura del filtro. (Sánchez, L. et al, 2007)

La utilidad del drenaje reside en (Sánchez, L. et al, 2007):

• Soportar el material filtrante e impedir su arrastre

• Asegurar la recolección uniforme del agua filtrada en toda el área de filtración

• Permitir el llenado de los filtros y eliminar burbujas de aire.

La capa de agua sobrenadante proporciona la carga hidráulica necesaria para permitir su paso a través del lecho de arena. En un lecho limpio, la perdida de carga inicial se encuentra por debajo de 0.1 m, pero luego incrementa hasta que se alcanza el nivel máximo. Las investigaciones reportan alturas máximas de agua sobrenadante en un rango entre 0.6 a 1.2 m. (Sánchez, L. et al, 2007): El lecho filtrante es de arena relativamente fina que posee las siguientes características: diámetro efectivo (d10) de 0.15 a 0.3 mm y un coeficiente de uniformidad, Cu = d60/d10 menor de 5. Se utiliza arena fina para asegurar la remoción de impurezas del agua en la parte superior del lecho de arena. La profundidad mínima del lecho de arena debe ser de 0.4 a 0.5 m y la arena debe estar limpia y libre de arcilla, tierra y material orgánico. Por este motivo es necesario lavarla antes de ser instalada dentro de la unidad de filtración. (Sánchez, L. et al, 2007).

En un filtro lento tradicional la potabilización del agua se realiza por un flujo descendente a través de un lecho de arena, donde se lleva a cabo un proceso extremadamente complejo que comprende varias operaciones unitarias (EnoHSa, 2007):

- Tamizado.
- Sedimentación.
- Adsorción.
- Oxidación.
- Acción bacteriana.

El agua a tratar entra en el volumen líquido que se encuentra encima del lecho filtrante o sobrenadante. Su estadía en esta fase sirve para sedimentar las partículas más grandes y aglutinar a las más pequeñas para facilitar su remoción. A su vez crecen algas en las capas superiores bajo la influencia de la luz solar, que en general son favorables al tomar del agua dióxido de carbono, nitratos, fosfatos y otros nutrientes para formar material celular y oxígeno. (EnoHSa, 2007)

Sobre la superficie del lecho de arena y en la primera capa del filtro se forma paulatinamente, una capa delgada activa denominada capa biológica o schmutzdecke, de contextura gelatinosa. El tiempo que se requiere para que esto ocurra denomina período de maduración. Esta capa juega un papel transcendental en la purificación del agua, sin embargo su espesor no debe ser obstáculo para que penetren adecuadamente las partículas, de modo que cuando la carga hidráulica baja significativamente, esta debe ser removida.

Ese recubrimiento forma una masa de microorganismos (bacterias, bacteriófagos, rotíferos y protozoarios), que obtienen la energía de la luz solar, y digieren y desdoblan en elementos más simples e inocuos al material retenido y muy especialmente a las bacterias patógenas. (EnoHSa, 2007)

En el pasaje del agua por los poros del manto de arena, el agua cambia continuamente de dirección favoreciendo el contacto de sus impurezas con los granos del medio, reteniéndolas en su mayor parte hasta cerca de 40 cm de profundidad del lecho. Es decir se producen acciones distintas como son el transporte, la adherencia o adsorción y la actividad biológica. (EnoHSa, 2007)

Se tienen dos tipos de FLA, cuya diferencia se encuentra en el nivel del sobrenadante y el nivel en la cámara colectora (EnoHSa, 2007):

a. Sistema de Filtros Lentos con Nivel Constante en el Sobrenadante y Variable en la Cámara Colectora de Agua Filtrada: tipo de filtración lenta más usado (Figura 2.2).

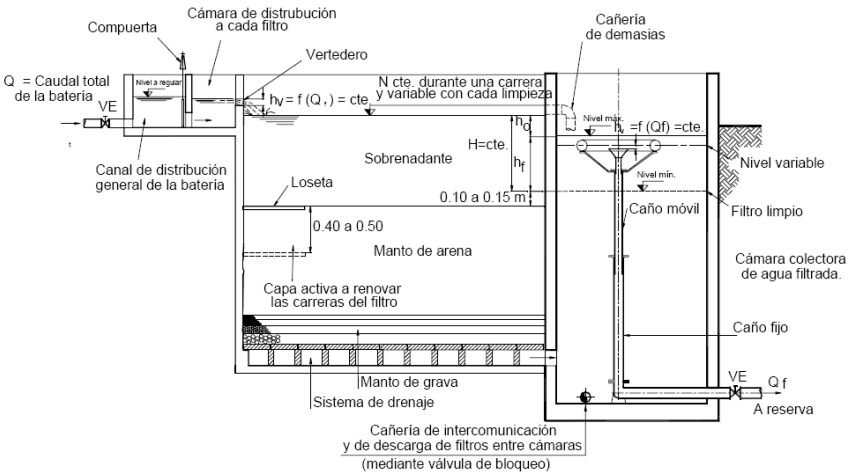


Figura 2.2. Detalle de un filtro lento con nivel constante del sobrenadante y variable en la cámara colectora de agua filtrada. (EnoHSa, 2007)

b. Sistema de Filtros Lentos de Nivel Variable en el Sobrenadante y Constante en la Cámara Colectora del Líquido Filtrado: consiste en derivar el caudal filtrado a las reservas de agua tratada, mediante un vertedero de umbral horizontal proyectado en uno de los lados de la cámara colectora (Figura 2.3). Esta modalidad está siendo adoptada en la actualidad, porque soluciona en forma sencilla uno de los elementos más vulnerables de un filtro lento convencional, como es el regulador de la velocidad de filtración.

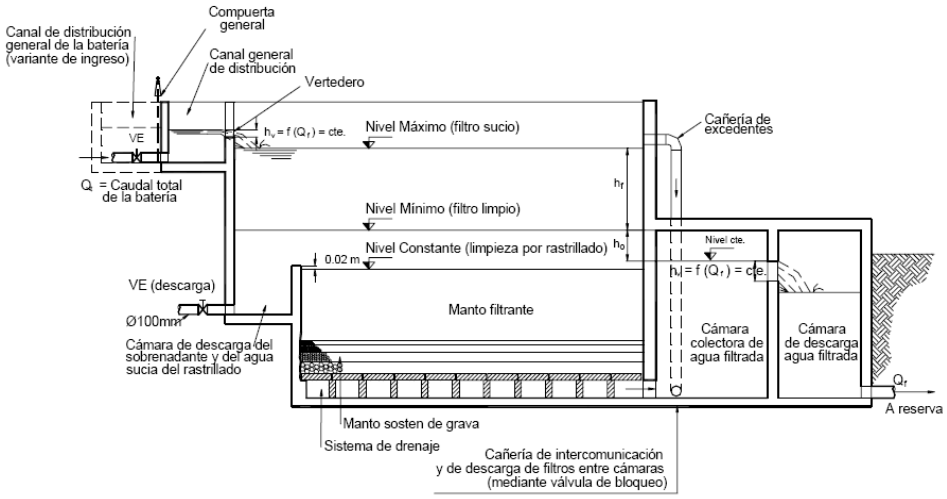


Figura 2.3. Corte longitudinal de un filtro lento con nivel variable del sobrenadante y constante en la cámara colectora de agua filtrada. (EnoHSa, 2007)

Debido a la importancia de la continuidad de los procesos biológicos, un sistema FLA debe incluir al menos dos unidades, permitiendo el abastecimiento continuo de agua y cuando uno de los filtros este fuera de servicio, el otro debe seguir operando y puede incrementarse la tasa de filtración en la otra unidad que está en operación. (Sánchez, L. et al, 2007)

El caudal en las unidades de FLA tiene que ser controlado para mantener una tasa de filtración adecuada, de manera que se asegure que los procesos biológicos reciban el oxígeno y los nutrientes necesarios. La tasa de filtración puede ser controlada a la entrada o a la salida del filtro. Un método usual en FLA es mantener el nivel de agua sobrenadante al máximo deseado sobre el lecho filtrante usando una válvula de control. La diferencia entre el nivel del agua sobrenadante dentro del filtro y el nivel del agua en la cámara de salida, suministra la fuerza que conduce el agua a través del filtro. (Sánchez, L. et al, 2007)

En filtros con control a la salida, inicialmente, cuando el lecho de arena está limpio, el agua podría fluir a una tasa de filtración demasiado alta. Para evitar esto, la válvula de salida está casi cerrada con el fin de crear resistencia al flujo o pérdida de carga que asegure la tasa de filtración apropiada. Como la superficie del filtro gradualmente se colmata por las impurezas hasta la pérdida de carga aumenta. Para compensar esa perdida la válvula de salida gradualmente debe ser abierta para mantener el caudal del filtro a la tasa deseada. (Sánchez, L. et al, 2007)

Cuando el control se realiza en la entrada de los filtros, se compensa la pérdida de carga mediante un incremento en la altura del agua sobrenadante, por lo cual se incrementa la presión del agua para mantener la tasa de flujo a través del filtro. Se ha demostrado un desempeño similar en términos de la calidad del agua efluente, la pérdida de carga en el lecho filtrante y en la duración de operación continua para las unidades de FLA funcionando en paralelo, con velocidades de filtración entre 0.13 – 0.5 m/h. (Sánchez, L. et al, 2007).

2.2.3. FiME

La Filtración en Múltiples Etapas (FiME), es una combinación de Filtración Lenta en Arena (FLA) y de Filtración Gruesa (FG) en grava. El desarrollo de la FiME en América Latina comenzó en los 80´s con prometedores resultados. Sin embargo hasta inicios de los noventas es que se alcanzan grandes avances, gracias a investigaciones con unidades piloto, dirigidas por el Instituto CINARA de la Universidad del Valle en Cali, Colombia, apoyado por el Centro Internacional en Agua y Saneamiento IRC. (IRC, 2005)

La FiME nació como respuesta a las inquietudes alrededor de las limitaciones de la FLA, por lo que se empezó a experimentar con la filtración en grava. Gracias a los resultados alentadores se consiguió el apoyo del gobierno de Holanda y algunas instituciones en Colombia, para realizar una investigación más profunda coordinada por el Instituto CINARA y el IRC. (Sánchez, L. et al, 2007) Se utilizaron diferentes combinaciones de FG y FLA, para tratar aguas con altos niveles de contaminación microbiológica y que presentaban variaciones en su calidad fisicoquímica. De este modo se desarrollaron sistemas de pre-tratamiento de bajo costo y fácil operación y mantenimiento, para mejorar la calidad del agua antes del proceso con FLA de gran aplicación especialmente en la zona rural.

Mediante el TRANSCOL –proyecto de iniciativa colombiana–, se realizó la transferencia de la tecnología FiME a ocho regiones de Colombia. Sus efectos positivos llevaron a ampliar la experiencia de la tecnología FiME en muchos otros países, entre ellos México, Ecuador, Bolivia, Perú, Brasil, Nicaragua, Estados Unidos, Honduras y algunos países Africanos. (Sánchez, L. et al, 2007)

La FiME posibilita el tratamiento de agua con niveles de contaminación muy superiores a los que se pueden tratar utilizando sólo la FLA. Conserva las ventajas de la FLA y es mucho más sostenible que el tratamiento químico del agua para las comunidades rurales. Además puede ser mantenida por operadores con bajos niveles de escolaridad. Se pueden agregar otros procesos de tratamiento iníciales como la sedimentación, las trampas de arena y rejillas. Y es recomendable incluir la desinfección final como una barrera de seguridad después de la FiME (Figura 2.4). (Sánchez, L. et al, 2007)

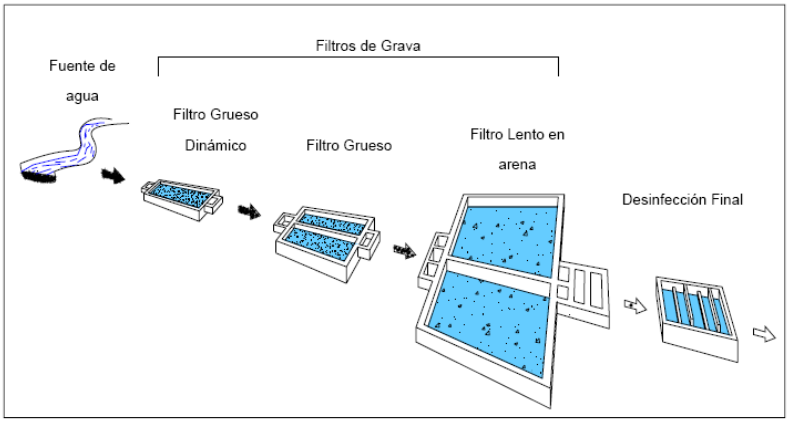


Figura 2.1. Esquema general de una planta de tratamiento de agua por Filtración en Múltiples Etapas (Galvis, G.,1999).

Existen varias opciones de posibles combinaciones de filtración en grava que se pueden emplear en las etapas de tratamiento de un sistema FiME (Anexo 1). Es necesario que las combinaciones estén apropiadamente especificadas para cumplir con los requerimientos respecto a la calidad del agua y los objetivos de tratamiento.

2.3 Procesos de Desinfección Final

2.3.1 Propiedades del desinfectante ideal

Los desinfectantes del agua deben contar con las siguientes características, según Witt, y Reiff (1996):

i. Debe ser insensible a parámetros físico-químicos que ocurren en el agua.
ii. Inactivar a todos los patógenos en un mismo porcentaje.
iii. No debe producir subproductos durante el proceso.
iv. Debe inactivar patógenos del interior o de la superficie de partículas presentes en agua.
v. Debe ser capaz de eliminar cualquier proceso de reparación posterior a la desinfección.
vi. En términos de costo-beneficio, debe ser fácilmente incorporable a los procesos de tratamiento de agua.
vii. Debe ser seguro, fácil de manejarse y aplicarse.
viii. Fiable en diversas condiciones que se encuentren en el sistema de abastecimiento de agua.
ix. Debe ser capaz de mantener una concentración residual en el sistema de distribución de suministro de agua, como resguardo contra la recontaminación o el rebrote de microorganismos.
x. La determinación de la concentración de desinfectante en el agua debe ser sencilla, rápida, y apropiada para realizarse en el campo así como en el laboratorio.

2.3.2 Mecanismos de acción de los desinfectantes:

Los diferentes mecanismos por los que actúan los desinfectantes, sobre los microorganismos contenidos en el agua, son (García, J. et al. 2002):

i. Daño a la pared celular.
ii. Alteración de la permeabilidad de las células.
iii. Alteración de la naturaleza coloidal del protoplasma.
iv. Inhibición de la actividad enzimática.

2.3.3 Tipos de desinfección

Ningún desinfectante cumple a cabalidad los requisitos o características nombradas anteriormente, sin embargo existen diferentes alternativas para la desinfección final del agua, de modo que ésta sea apta para el consumo humano, cada una con sus ventajas y desventajas. Dentro de las principales se encuentran, la cloración, ozonización, luz ultravioleta (UV) y la desinfección con yodo, tratados en detalle en el Anexo 2, junto con los microorganismos indicadores de la calidad del agua y del desempeño de estos diferentes métodos de desinfección.

CAPITULO III

ANTECEDENTES DEL PROYECTO

CAPITULO III

ANTECEDENTES DEL PROYECTO

3. Generalidades

3.1 Ubicación

El acueducto Quebrada Yugo, se localiza en el poblado La Sierra, del distrito de San Cristóbal, perteneciente al cantón de Desamparados, en la provincia de San José, sobre la Ruta 2, en la desviación hacia Frailes 500 m sobre la misma (Figura 3.1). Las coordenadas geográficas del cuadrante de su ubicación de la hoja Topográfica Tapantí del Instituto Geográfico Nacional, son 538 000 y 539 000 longitud oeste y 193 000 y 192 000 latitud norte.

Se ubica en la zona climatológica Región Central, afectada por las condiciones del pacífico, en la Zona de Convergencia Intertropical y los vientos ecuatoriales, así como por la influencia del Caribe, con los vientos alisios del noroeste, con derrame de nubosidad y lluvias que llegan al valle por los pasos entre montañas (Solano y Villalobos citados por IMN). El clima de las zonas altas -como es el caso- es más lluvioso y frío, característico de las zonas de montaña. Presenta mayor precipitación durante los meses de diciembre, enero y febrero, producto de la mayor influencia del Caribe, que se evidencia también en la corta duración del veranillo. Lo cual permite que en periodo seco la humedad ambiental no sea tan baja y las temperaturas no tan altas como en el Pacífico Norte (IMN).

La zona en la que se ubica el acueducto y sus fuentes, se encuentran la subcuenca Río Grande de Candelaria con 70 684, 251 ha, perteneciente a la gran cuenca Costero Pacífico Central, parte de la Vertiente del Pacífico. Y la subcuenca Río Reventazón de 188 978,655 he, parte de la Cuenca Costero Caribeño, perteneciente a la Vertiente Atlántica.

3.2 Población abastecida por el sistema

El acueducto abastece actualmente los pueblos de La Sierra, Bustamante, Santa Elena, La Violeta, Frailes, La Paz, San Cristóbal, Monterrey y Alto Buena Vista (Figura 3.1). Posee 648 abonados.

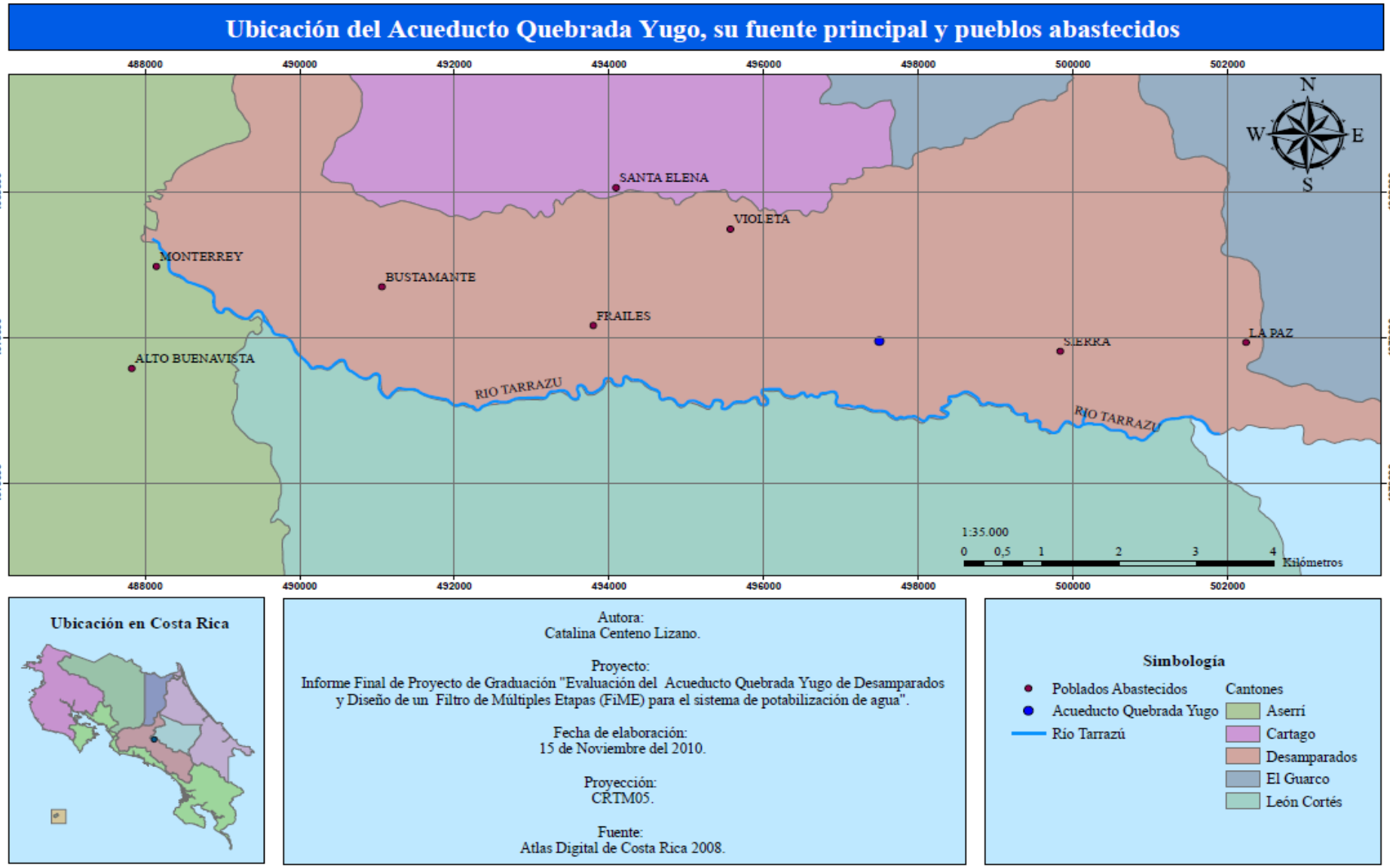


Figura 3.1. Mapa de la ubicación del acueducto Quebrada Yugo, su fuente principal y los poblados abastecidos. Elaborado en ArcGis 9.3.

3.3 Fundación del acueducto

El acueducto fue fundado en el año 1986, por una junta compuesta de vecinos, que posteriormente pasó a ser la junta administradora del sistema. La fuente abastecedora correspondía al río Tarrazú y el sistema consistía en la toma del río, las tuberías de conducción, un tanque de cloración como único tratamiento y las tuberías de distribución. Los constantes problemas de arrastre y turbiedad obligan a cambiar la fuente, por el agua de la quebrada El Yugo -uno de los ramales del río-, que le da nombre al sistema.

3.4 Administración del Acueducto

El acueducto se encuentra desde su fundación en manos de una ASADA. La administración del sistema potabilizador, del suministro de agua potable y el control financiero, además de las actividades que se relacionen con el manejo del recurso hídrico del acueducto, directa e indirectamente, son responsabilidad del comité de vecinos que conforman la ASADA.

3.5 Problemática

Existe un problema de fondo que involucra al país en cuanto a la integración y apoyo de los entes que brindan el servicio de agua potable, lo cual ha devenido en la carencia de ayuda técnica requerida por las asociaciones administradoras de acueductos y alcantarillados rurales (Anexo 3).

En el caso de las ASADAS, estas no han podido desarrollar un sistema adecuado de potabilización y distribución del recurso hídrico, debido a que en su mayoría se encuentran integradas por vecinos de la comunidad sin experiencia en el tema de agua potable, además de carecer de recursos suficientes para la construcción, mantenimiento, operación del acueducto así como de equipo. A esta situación se ve aunada la ausencia del AyA en apoyo constante, capacitación y regulación de estas asociaciones, deberes que le impone la ley, sin embargo no se llevan a cabo.

Esta es la realidad de la ASADA de Quebrada Yugo, cuyo sistema de potabilización se encuentra constituido por los siguientes elementos: zona de captación, líneas de conducción a la planta, vertedero, cámara de desvío, dos filtros lentos en paralelo, cloración por electrólisis, un tanque de contacto y la red de distribución.

La ASADA posee solamente un fontanero, encargado del total de la planta y de las actividades relacionadas de mantenimiento, atención de fugas, conexiones, lectura de consumo, etc. La escasa capacitación genera una inadecuada operación y mantenimiento del acueducto, incluyendo los Filtros Lentos y la cloración, así como un control escaso de la calidad del agua, de las características y ciclos de variación del caudal (picos de turbiedad, color, etc), tanto de la entrada (agua cruda) como de la salida del sistema.

Además se ha experimentado un aumento de turbiedad del agua captada por la planta potabilizadora, provocando la saturación de los dos Filtros Lentos que posee el sistema, ya que no se encuentran en capacidad de filtrar eficientemente aguas con valores superiores a 100 UNT. De este modo el diseño actual del sistema de potabilización se ha vuelto inadecuado, de acuerdo a las características del agua que lo alimenta, por lo que produce agua potable de calidad deficiente. Debido a que el tratamiento provisto por los FLA de la planta, no puede disminuir la turbiedad de las aguas captadas, esta es liberada por medio de un sistema de desviación automática que se activa cuando las lecturas de la turbiedad del efluente se encuentran por encima de 100 UNT.

3.6 Sistema de potabilización:

3.6.1. Elementos y procesos del sistema de potabilización Quebrada Yugo.

El sistema de potabilización está constituido por los siguientes elementos (Figura 3.2):

1. Obras de captación: Dos tomas de fuentes de agua, superficial y subterránea.
2. Tuberías de conducción del agua cruda hacia la planta.
3. Dos desarenadores paralelos.
4. Sistema automático de medición de turbiedad y control de entrada de caudal.
5. Dos filtros lentos de arena en paralelo.
6. Canaletas colectoras del agua filtrada.
7. Sistema de cloración por electrólisis.
8. Tanque de contacto.
9. Tubería de distribución de agua potable.
10. Seis tanques de almacenamiento.
11. Nueve quiebra gradientes.

Figura 3.2. Proceso de potabilización de la planta Quebrada Yugo.

3.6.2. Descripción del sistema potabilizador

Obra de captación

El acueducto cuenta con dos fuentes de agua, tanto superficial, como subterránea. La primera proviene de la quebrada El Yugo, principal fuente del líquido (Figuras A.7.1 y A.7.2.). La segunda la constituye una naciente.

La obra de captación en la quebrada, consiste solamente, en un muro colector de agua, en forma de "V", de 0,70m de profundidad, con una base río abajo de piedra y cemento (Figuras A.7.3). En el vértice del muro se encuentra la tubería de cuatro pulgadas, la cual atraviesa este muro río arriba, y sigue 0,50 m, en su terminación posee un codo dirigido hacia la derecha, por donde se colecta el agua.

La obra de captación de la naciente cercana a la quebrada, constituye una base de piedra poco profunda, que rodea un balde plástico perforado, con capacidad de 5 gal, ubicado a nivel superficial del terreno (Figuras A.7.6 a A.7.9.).

El agua se filtra a través de la base de piedra y entra por medio de las aberturas rectangulares alargadas en la base del balde, donde es colectada por una tubería de 4". La tubería se une posteriormente con la conducción del agua proveniente de la quebrada.

Desarenadores

El caudal proveniente de la quebrada y la naciente, es llevado por tuberías hasta dos desarenadores paralelos, donde se colecta el material de arrastre, para ser luego conducido al sistema de potabilización (Figuras A.7.10 a A.7.17). Los desarenadores funcionan mediante flujo horizontal, y se encuentran ubicados cerca de las captaciones. Sus dimensiones son 3,80 m x 2,70 m x 1,20 m. A su salida poseen un sistema de rejillas para atrapar los sólidos no sedimentables, como la hojarasca.

Línea de conducción

El caudal compuesto por las dos fuentes llega por gravedad hasta la planta, mediante un sistema de tuberías de cuatro pulgadas de ocho kilómetros de largo (Figura A.7.18) y medio kilómetro de tres pulgadas.

La tubería atraviesa la zona montañosa y quebrada del lugar, habiendo sido planeada de este modo, con el fin de aprovechar la gravedad, como fuerza motriz para impulsar el líquido hasta el acueducto.

Planta Potabilizadora

La planta potabilizadora está constituida por el sistema de entrada de caudal, sistema automático de medición de turbiedad y desvío de caudal, dos filtros lentos de arena (FLA) paralelos, dos áreas de lavado de arena, canaletas colectoras del agua filtrada, sistema de cloración por electrólisis, sistema de válvulas automáticas y manuales, un tanque de contacto y distribución.

La tubería de conducción, posee tres ramales en la entrada a la planta, para alimentar el sistema de medición de turbiedad, el área de lavado de arena y la casa ubicada en el acueducto (Figuras A.7.20 y A.7.21).

Control automático de turbiedad

El sistema de medición automático de turbiedad -GLI International Modelo 8324-, controla la entrada del líquido a la planta. Se encuentra ubicado en una caseta independiente, luego de los filtros lentos. Para realizar la medición recibe una pulgada de agua, cuyo caudal pasa por un sifón (Figura A.7.22) y luego al lector (Figura A.7.23). El resultado se muestra en una pantalla digital -GLI International Modelo 53-, ubicada en el panel de control (Figuras A.7.24 a A.7.26). De acuerdo a este resultado se envía una señal a la bomba automática de alimentación para permitir la entrada del agua a los filtros, o desviar el caudal hacia el canal lateral, el cual desemboca en una quebrada cercana, junto con el efluente proveniente del lector.

El sistema se encuentra programado para interrumpir la alimentación cuando la turbiedad es mayor a 100 UNT, y realizar la reconexión a 30 UNT. Con una turbiedad menor a 100 UNT el agua es apta para entrar al tratamiento, de lo contrario colmataría los filtros y colapsaría el sistema.

Este sistema de válvulas automáticas poseen tres modos: automático, manual y fuera (Figura A.7.28). Si se coloca en modo manual el operario debe poner a funcionar el sistema, y cuenta con dos opciones, alimentar los filtros o desviar el caudal a la quebrada. En modo automático el sistema realiza esta función de acuerdo a la turbiedad obtenida.

De acuerdo al modo seleccionado se muestra el estado (activado o desactivado) de las válvulas automáticas (Figura A.7.27):

a. Alimentación a filtros.
b. Retorno a río.
c. Salida filtro 1.
d. Salida filtro 2.
e. Formación de cloro.

Se cuenta además con una batería auxiliar con capacidad para brindar suministro eléctrico por una hora (Figura A.7.24), en caso que no se tenga electricidad, estas funciones son asumidas por las válvulas manuales (Figura A.7.28).

Cámara de entrada y Alimentación a Filtros

El sistema de entrada de caudal y de flujo ascendente, y se divide en dos compartimientos, que alimentan los filtros paralelos, regulados por compuertas. (Figuras A.7.30 a A.7.33). La cámara de entrada está construida en concreto y cuenta con un vertedero colocado a 0,65 m de la pared aguas arriba.

Filtros Lentos de Arena

Las unidades FLA paralelas (Figura A.7.35) funcionan mediante flujo descendente, y se encuentran conformadas por cinco estratos filtrantes con un metro de profundidad cada uno: la superficial de arena, seguida por la capa de arrocillo, luego se encuentra un estrato de piedra cuarta, seguido de piedra papilla y la base de piedra de soporte. Sus dimensiones son 3x4x3 m y su material estructural es concreto.

El sistema de válvulas automático de los filtros se compone por 3 unidades para cada cámara. Poseen una capacidad de llenado de agua de 1,30 m por encima de la capa de arena, con una entrada para el afluente (Figura A.7.32) y cuatro para el efluente (Figuras A.7.35 y A.7.36), distribuidas así:

- Salida subterránea para el filtrado.
- Salida superficial que facilita el vaciado. (Figuras A.7.35 y A.7.36).
- Dos salidas del caudal de rebose a 0,30 cm. (Figuras A.7.35 y A.7.36).

La salida superficial al nivel de la arena, y las dos salidas del caudal de rebose, se captan en un mismo sistema de tuberías (Figura A.7.37), que dirige el caudal hacia un canal lateral que desemboca en una quebrada cercana. La salida subterránea desemboca en las canaletas colectoras de agua filtrada (Figura A.7.39).

Área de lavado de Arena

A los lados de la entrada del caudal a la planta, se encuentra el área de lavado de arena, constituidas por dos compartimientos de concreto -una para cada FLA-, techados, con dimensiones de 3 x 4 x 0, 30 m (Figura A.7.38). Cuentan con una entrada de agua, para la limpieza, y un leve desnivel, que guía las aguas hacia la salida, compuesta por un orificio de 2 pulgadas de diámetro. Esta salida desemboca en el canal lateral de descarte de aguas.

Canaletas colectoras de agua filtrada

El agua filtrada es llevada hasta dos canaletas paralelas, ubicadas en la casetilla de medición de turbiedad (Figura A.7.39). Estas canaletas permiten el control de la calidad del agua, producida por los filtros lentos. Su efluente es conducido por una tubería de 6 pulgadas, hacia el tanque de contacto.

Tanque de Contacto

El agua filtrada se deposita en el tanque de contacto (Figura A.7.40), donde se realiza la cloración. Sus dimensiones son 9,30 x 8,90 x 3,90 m.

Desinfección

La planta cuenta con un sistema semiautomático de cloración por electrólisis, marca Sanilec 6 Eltech, donde por medio de un electrodo se obtiene la disolución de ácido hipocloroso (Figuras A.7.41 a A.7.43). Este sistema se encuentra ubicado en una casetilla independiente (Figura A.7.40).

Realizado el proceso de electrólisis se dosifica la disolución de cloro al tanque de contacto, con un flujo de 350ml/min (Figura A.7.44).

Sistema de distribución

El agua clorada en el tanque de contacto, se distribuye a los 648 abonados del acueducto, en los poblados de La Lucha, La Paz, Cristo Rey, San Cristóbal Sur y Frailes, mediante tuberías, bombas, quiebra gradientes (nueve) y tanques de almacenamiento (seis) (Figuras A.7.48 a A.7.51). La tubería de distribución de agua potable está compuesta por tres kilómetros de seis pulgadas, cinco kilómetros de cuatro pulgadas, ocho kilómetros de tres pulgadas, trece kilómetros de dos pulgadas y media, siete kilómetros de dos pulgadas, dos kilómetros y medio de una pulgada y media, seis kilómetros de una pulgada, más los ramales: cuatro kilómetros de una pulgada y media, un kilómetro y medio de ese mismo calibre, seis kilómetros de una pulgada, para un total de 56 kilómetros de tubería de distribución.

CAPITULO IV

EVALUACIÓN DE LA PLANTA DEL SISTEMA DE POTABILIZACIÓN

CAPITULO IV

EVALUACIÓN DE LA PLANTA DEL SISTEMA DE POTABILIZACIÓN

4. Evaluación del sistema

La evaluación trata primero el diseño y estado de los elementos esenciales de cada unidad del sistema potabilizador, desde las captaciones hasta el almacenamiento domiciliar. La sección de FLA se basa en la guía CEPIS (1992), la evaluación los desarenadores en CEPIS y OPS (2005), y la revisión del sistema de cloración en CEPIS (2004). La evaluación de los parámetros de funcionamiento de los FLA, condiciones de cloración y la eficiencia del sistema se exponen en el capítulo 6 Resultados y Discusión.

4.1. Captación de la quebrada

El muro de la captación posee una altura sumamente baja de 0,70m (Figura A.7.3), que provoca que en verano el nivel del agua sea tan poco profundo, que entra aire al sistema. Esta situación se agrava con la conexión de la tubería de la naciente, que se acopla perpendicularmente a pocos metros de esta toma, provocando un contra flujo, debido al choque de ambos fluidos con direcciones distintas.

La estructura de la toma adolece de un sistema de rejillas, que eviten el paso de sólidos hacia la tubería, por lo que constantemente se atasca. Esto también provoca que llegue gran cantidad de material a los desarenadores, colmándolos rápidamente, siendo más significativo en época lluviosa, por el arrastre de sedimentos.

La toma debe ser rediseñada ya que permite el paso libre a todo el material de arrastre, perjudicando grandemente las tuberías, la función de los desarenadores y de los FLA. Esta debe poseer un muro más alto para aumentar el nivel de agua, que en verano impida la entrada de aire y en invierno permita la sedimentación de materiales, junto con un sistema de lavado y purga de material acumulado. A su vez se debe colocar un sistema de cribado para retener sólidos gruesos, con rejillas inclinadas con fondo conectado al sistema de lavado.

4.2. Captación de la naciente

La obra de captación debe asegurar la seguridad de la fuente subterránea, protegerla de contaminación, además de permitir la recolección del fluido, su control, medición y contar con un sistema de inspección y lavado (Figuras A.7.6 a A.7.9).

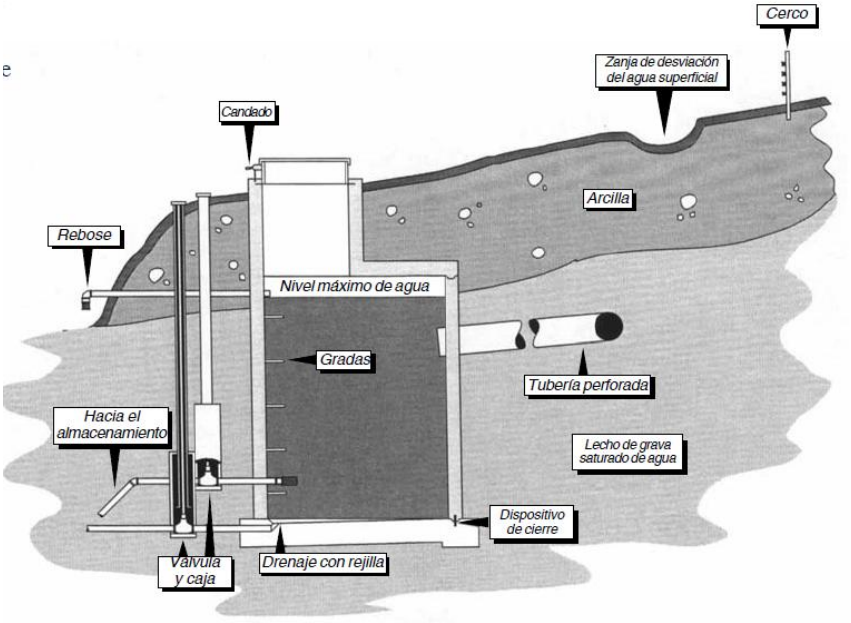


Figura 4.1. Elementos básicos en la captación de fuentes subterráneas del tipo manantial.
Fuente: CEPIS, 2001.

Las aberturas en el balde se encuentran hasta la base del mismo, por lo que no supone un sistema de recolección de agua sino sólo distribuidor. De tal manera que no se asegura un nivel mínimo de líquido dentro del balde, por lo que el aire penetra en la tubería, y mucho más en verano, cuando el caudal de la naciente disminuye considerablemente.

El sistema no capta la totalidad del agua, ya que ésta fluye por debajo de la base de piedra. Por este motivo el fontanero colocó una tubería que recoge el agua que discurre y la unió con la tubería principal.

Dadas las deficiencias de la obra de captación, se debe rediseñar el sistema de modo que permita colectar adecuadamente el agua y cuente con los elementos básicos de seguridad, operación y mantenimiento.

4.3. Obras de protección de las fuentes de agua

Un aspecto importante constituye la revisión de la captación de ambas fuentes, de acuerdo a la existencia de normas de seguridad, que prevengan su contaminación tanto natural como antropogénica.

4.3.1. Zona de protección

El Artículo 33, del Capítulo IV sobre Protección forestal, de la Ley Forestal No. 7575, declara como áreas de protección relacionadas:

a. "*las áreas que bordeen nacientes permanentes, definidas en un radio de cien metros medidos de modo horizontal.*"

b. "*una franja de quince metros en zona Rural y de diez metros en zona urbana, medidas horizontalmente a ambos lados, en las Riberas de los Ríos, quebradas o arroyos, si el terreno es plano, y de cincuenta metros horizontales, si el terreno es quebrado.*"

En ninguno de los dos casos se respeta estas zonas. El terreno de protección que rodea la naciente, que alimenta la planta no posee la extensión establecida por ley (Figura A.7.5). Y en sus inmediaciones se desarrollan actividades ganaderas y de cultivo principalmente, ambas no extensivas.

4.3.2. Camino de acceso a las fuentes de agua

El camino para llegar a las obras de captación, es un camino sin pavimentar y se debe avanzar a pie los últimos 800 metros por terrenos fangosos -en invierno- y con despeñaderos, que ponen en peligro al personal de la planta.

4.3.3. Uso de la tierra

En los terrenos de captación abunda la vegetación natural, que se mezcla con siembras de mora, típica de esta zona fría. Existen casas cercanas, a unos 400 m, cuyos pobladores se dedican en su mayoría a recolectar mora. También poseen ganado, que se encuentra disperso por el terreno, además de perros. A lo largo del río cercano se encuentran casas, cuyas aguas negras y grises se vierten en él y en la quebrada.

El lugar donde se localiza la naciente, corresponde a una propiedad privada, con una casa abandonada. Pero se le provee mantenimiento a la zona verde, por lo que es común observar a un trabajador realizando estas tareas.

4.3.4. Facilidad de acceso para extraños

El lugar de las tomas de agua, es de fácil acceso a las personas. Como corresponde a un área habitada, con sembradíos de mora, y ganado, existen caminos con paso frecuente de personas y animales. Lo cual constituye un riesgo de contaminación de las fuentes.

La entrada al área donde se localiza la naciente, solamente está vedada por una cerca de alambres de púas. Posee un lado sin fijar que puede correrse para ingresar, pero no cuenta con candado, pero si fuese así, aún de ese modo se puede entrar fácilmente (Figuras A.7.4 y A.7.5).

4.3.5. Boca de inspección del sistema colector de la naciente

La toma de la naciente se encuentra protegida por una serie de bloques de cemento. El balde posee una tapa de diámetro menor, confeccionada en cemento, con una manija para facilitar su sustracción. Esta tapa se encuentra atada con una cadena y un candado, a la base de piedra (Figuras A.7.6 a A.7.9). Empero la tapa se puede levantar ya que la cadena es larga, quedando expuesta la toma al acceso de extraños. Por este motivo se debe corregir esta situación y proteger adecuadamente la captación.

A los lados del balde se colocaron dos bloques de cemento fijos verticalmente y sobre éstos se posa otro bloque horizontalmente, que resguarda la tapa del balde.

4.3.6. Protección de las aberturas

Las aberturas del recipiente que colecta las aguas de la naciente, no cuentan con un cedazo que evite el paso de materiales extraños a la tubería (Figuras A.7.6 a A.7.9).

4.3.7. Drenaje de aguas superficiales

En las inmediaciones de la naciente existen árboles, con raíces expuestas que filtran agua y hacen el terreno fangoso, aunado a las aguas de precipitaciones. La solución dada por el personal de la planta, consiste en la colocación de láminas de zinc sobre el terreno, para desviar el agua fuera de la zona inmediata de captación. No sólo por la lixiviación de compuestos causada por la oxidación, sino también porque esta solución no satisface los requerimientos de un sistema de recolección y desviación de aguas superficiales, es debe hacerse un cambio en este aspecto.

4.3.8. Eventuales focos de contaminación en los puntos de extracción

Los focos de contaminación antropogénica se vinculan con la cercanía a caseríos, la presencia de ganado, perros, que ocasionan contaminación de las fuentes, especialmente de tipo fecal.

4.4. Desarenadores

4.4.1. Ubicación

Cercanos a la zona de captación se encuentran los desarenadores, al margen del río Tarrazú. La ubicación de los desarenadores no es la adecuada, por diferentes motivos. Están construidos en la zona de protección, de cincuenta metros horizontales de la ribera del río, establecidos en el artículo 33, del Capítulo IV de la Ley Forestal 7575. Aparte de eso se debe cruzar el río para llegar a ellos. (Figura A.7.11)

4.4.2. Acceso

Antes del año 2009 no se contaba con un puente, por lo que se debía pasar por en medio del río, lo cual se dificultaba en la época lluviosa cuando el caudal aumenta, haciendo que algunas veces fuera peligroso e imposible trasladarse al margen opuesto. Empero el puente actual no cumple con normas mínimas de seguridad y además se encuentra colapsado en el medio debido al peso de la misma, por mal diseño. (Figura A.7.10)

Al estar los desarenadores tan cerca del río también pone en peligro la vida del personal, en caso de una crecida o cabeza de agua, o de quedar aislados ya que de ese lado empieza a elevarse abruptamente el terreno. Todo esto se hubiera evitado al colocar los desarenadores al otro lado del río y más alejados de él, respetando la zona protegida por ley.

4.4.3. Tuberías de alimentación del desarenador

Las aguas captadas son llevadas hasta los desarenadores por una tubería de 4 ", que cruza el río de manera aérea, estando sujetadas en los árboles. Debido al peso y los pocos soportes, la tubería está arqueada y presenta constante movimiento, que al roce con los troncos de los árboles, provoca fugas en las uniones.

Cuando se inició la operación del acueducto, el río constituía la fuente de agua, y era llevada directamente hacia los desarenadores por una tubería de seis pulgadas. Luego de cambiar la fuente abastecedora, se realizó la conexión a un lado de los desarenadores, después del vertedero de la cámara de entrada, quedando inutilizada ésta última (Figura A.7.13). Al hacer esa conexión se afectó el proceso diseñado de sedimentación de partículas.

A parte de estar en un lugar inapropiado, la tubería actual no cuenta con un apoyo adecuado. El constante movimiento fragmentó la pared a la cual se conectó, y se trató de disminuir colocándole piedras. Sin embargo la fuerza del fluido sigue provocando el movimiento, levantando las piedras, poniendo en peligro la tubería y la estructura.

4.4.4. Número de unidades

El número de unidades mínimas en paralelo debe ser de dos, para efectos de mantenimiento, como es el caso de los desarenadores evaluados.

4.4.5. Zona de entrada

Su función consiste en permitir una distribución uniforme de las líneas de flujo y de velocidad dentro de la unidad (CEPIS y OPS, 2005), así como colectar los sólidos más gruesos. Función que no puede realizarse, ya que la entrada de caudal se colocó después del vertedero (Figuras A.7.12 y A.7.13). La cámara de entrada carece de la transición en la unión de la tubería de llegada al desarenador, que asegurare la uniformidad de la velocidad en la zona de entrada.

4.4.6. Zona de sedimentación

En esta zona se lleva a cabo el proceso de depósito de partículas por acción de la gravedad. El flujo debe ser horizontal y de tipo pistón, que permita que las partículas se asienten (CEPIS y OPS, 2005).

En los desarenadores con que cuenta la planta, la entrada del caudal se divide en forma de "T" invertida, hacia las dos cámaras de desarenado (Figura A.7.12). Esta estructura no permite que el flujo se mueva de forma que la velocidad sea uniforme en cada corte horizontal del fluido, es decir, flujo pistón. Lo cual provoca que las partículas posean velocidades diferentes en un mismo punto, alterando la cinética de las mismas y el proceso de sedimentación, con efectos en su eficiencia.

La entrada de cada zona de sedimentación, tiene compuertas y rejillas para los sólidos grandes. Estas últimas son muy pequeñas, de modo que se atascan rápidamente (Figuras A.7.14 y A.7.15). Este punto es uno en los que repercute fuertemente la carencia de un sistema de rejillas en la captación, así como en el rápido llenado de los desarenadores y el paso de sólidos hacia la tubería de conducción, situaciones que se tratarán más adelante.

Las compuertas se encuentran en mal estado, herrumbradas y cubiertas por una capa biológica, lo cual les impide desempeñar bien su función, y permiten el paso parcial del agua.

4.4.7. Zona de salida

Esta área debe estar conformada por un vertedero de rebose, diseñado para mantener una velocidad que no altere el reposo de la arena sedimentada (CEPIS y OPS, 2005). En este caso corresponde a un vertedero de pared delgada, triangular con múltiples aberturas de rebose (Figura A.7.15).

Las aberturas se encuentran por debajo del nivel del agua en la cámara de salida, por lo que al cerrar la alimentación de uno de los desarenadores, para su mantenimiento, el agua se devuelve hacia la cámara (Figura A.7.15).

La cámara de salida posee una serie de rejillas, para retener material no sedimentables, como hojas (Figura A.7.16).

4.4.8. Zona de depósito y eliminación de la arena sedimentada

El material debe sedimentarse sobre una tolva con pendiente mínima de 10%, que permita el deslizamiento de la arena hacia el canal de limpieza de los sedimentos, además de contar con una tubería y válvula para su evacuación periódica (CEPIS y OPS, 2005).

El fondo de los desarenadores posee forma en "V" truncada por un canal para los sedimentos de 0, 20m de profundidad Figura A.7.17). El sistema de lavado, consiste únicamente de una salida de 3", en la entrada de los desarenadores, con una pendiente menor al 10%, siendo poco práctica, ya que solo es útil cuando el material acumulado no sobre pasa el canal, situación que nunca se presenta. Lo cual vuelve muy complicado el mantenimiento de estas estructuras.

La falta de rejillas en la captación, deja pasar material de diámetros tan grandes, que las cámaras rápidamente se colman de sólidos. Esto repercute sobre la calidad del efluente, el cual llega a la planta cargado de materiales más finos, por la incapacidad de los desarenadores de retenerlos, debido a la alta afluencia de contaminación, siendo más critica el escenario en invierno. Lo que a su vez trae grandes problemas en la limpieza de las cámaras, ya que la salida se obstruye por la gran cantidad de material, siendo incapaz de utilizarse para el lavado.

4.4.9. Protección del sistema

En la zona en la cual se ubican los desarenadores, existe población aunque con baja densidad, además de terrenos dedicados a la siembra de mora, por lo que es común encontrar trabajadores que recolectan los frutos. Estas estructuras no poseen ninguna protección contra el acceso a extraños, ni contra la intemperie. Por lo que hojas y otros materiales naturales caen en el sistema.

4.5. Tubería de conducción

Las tuberías de cuatro y tres pulgadas que llevan el agua cruda hacia la planta de potabilización, presentan un pequeño trecho de tres pulgadas entre la tubería de cuatro pulgadas.

El tener diferentes tamaños en la tubería, provoca inconvenientes debido al aire en el interior de la tubería, problemas de cavitación, y un flujo turbulento a la entrada de la planta. Conjuntamente a esto se tienen serios problemas de atascamiento de las tuberías, por paso de material que queda atrapado al no poder pasar de una tubería de mayor a menor diámetro, disminuyendo el flujo y aumentando peligrosamente la presión, la cual compromete el sistema y provoca fugas.

Se realizó un recorrido del sistema de tuberías de conducción para determinar su estado y acceso (Figura A.7.18). A lo largo del sistema de conducción se pueden observar conexiones con codos (Figura A.7.19), que no son recomendadas por favorecer el atascamiento de material en este accesorio, y debido al choque del fluido contra la tubería para realizar el cambio de dirección, siendo éste de mayor impacto cuanto mayor sea la velocidad de movimiento del líquido. Para disminuir estos contratiempos se debe cambiar los codos por accesorios Yee, que por uno de sus brazos permite el paso del fluido sin cambio brusco de dirección y por el otro se coloca un tapón para eliminar materiales ajenos a la tubería.

La tubería atraviesa el terreno montañoso hasta el acueducto, con tramos subterráneos y otros expuestos, llevando el agua por gravedad, por medio de lugares muy inclinados, con despeñaderos y precipicios. Lo cual dificulta su acceso y pone en peligro la integridad del personal.

4.6. Planta potabilizadora

La dinámica hidráulica del agua dentro del acueducto, se guía por medio de la gravedad, y los procesos del tratamiento se llevan a cabo utilizando esta fuerza impulsadora, desde la filtración hasta la cloración.

4.6.1. Estructura de ingreso a la planta

La entrada de caudal a la planta potabilizadora es por medio de una línea de tubería de 4" (Figura A.7.20) que desemboca en una cámara cuasi cuadrada de 0,90 m de ancho, por 1 m de largo (Figura A.7.30). Aunque la instalación de tubería es más sencilla, económica y rápida, una de sus desventajas consiste en la restricción de control de velocidad, de cambios de caudal y medición del mismo.

Por otra parte los canales son estructuras que permiten el control del flujo y de sus cambios, contando con una compuerta regulable y un vertedero. Además facilitan la limpieza e inspección (CEPIS, 2005).

4.6.2. Estructura de control del caudal de entrada

La planta posee una gran limitación en cuanto a control de caudal se refiere, ya que no cuenta con dispositivos adecuados de medición y regulación de flujo. El vertedero se encuentra justamente en la entrada del caudal a 0,65 m de la pared aguas arriba, es de tipo triangular y de pared delgada (Figura A.7.30).

Los vertederos tienen diferentes finalidades como garantizar la seguridad de la estructura hidráulica, al no permitir la elevación del nivel aguas arriba por encima del nivel máximo. Además de garantizar un nivel con poca variación en un canal aguas arriba y constituirse en una parte de una sección de aforo de un flujo.

De acuerdo a Chanson (2002) para obtener resultados confiables en la medición con el vertedero de pared delgada es importante que:

- Tenga la pared de aguas arriba vertical.
- Esté colocado perpendicularmente a la dirección de la corriente.
- La cresta del vertedero sea horizontal o, en el caso de que ésta sea triangular, la bisectriz del ángulo esté vertical.
- La carga h, sobre la cresta del vertedero debe ser medida a una distancia suficiente, aguas arriba, para no tener influencia de la curvatura de la superficie líquida en la proximidad del vertedero. Al menos se debe tener una distancia del vertedor aguas arriba mayor que 4h.

El vertedero resulta conveniente para realizar la medición del caudal disponible para asegurar el mantenimiento de los programas de suministro, determinar las cantidades de agua suministrada, descubrir las anomalías, estimar y averiguar el origen de las pérdidas que se produzcan en la conducción y de esta forma controlar el desperdicio (Villón 1985).

Sin embargo al no existir un canal, el vertedero se hace inútil pues es imposible medir la carga sobre el mismo. Además el agua entra en borbotones, debido al aire que penetra al sistema por la diferencia de diámetros en las tuberías de conducción y por los problemas de nivel de agua en la toma. Por lo que el flujo es turbulento impidiendo realizar mediciones, que requieren un flujo laminar. Por otra parte el vertedor se encuentra atascado, sumamente deteriorado por corrosión y crecimiento de flora.

Todo esto imposibilita utilizar el vertedero para medición de caudal. Haciendo necesarios cambios en el diseño de la estructura de entrada, con el fin de permitir la medición, el control, e inspección del flujo, aspecto sumamente necesario en el control de operación de la planta, además de facilitar el estudio cuantitativo de las variaciones del caudal y su relación en la eficiencia del sistema.

La tubería de entrada posee una llave de cierre, sin embargo no puede realizar la función de regulación de caudal entrante, ya que no se encuentra diseñada para ello, por lo que provocaría un aumento peligroso de la presión del líquido dentro de la tubería, que sería devastadora para el sistema.

Las válvulas de ingreso de caudal, tanto manual como automática, poseen la función de permitir o no la entrada de agua a la planta, desviándola cuando no es apta para el tratamiento. Estas válvulas permiten regular el caudal, sin embargo no se utilizan con ese fin.

En la captación tampoco se tiene un dispositivo de regulación de caudal. Cuando el agua cambia sus características, debido principalmente al arrastre de sedimento por las precipitaciones, se coloca un tapón en la tubería de captación, para evitar su ingreso al sistema.

4.6.3. Filtros Lentos de Arena Paralelos

Los FLA del acueducto tienen un área superficial de filtración de 54 m^2. El área de filtración máxima por módulo, corresponde a de 100 m^2, ya que valores mayores complican las labores manuales de operación y mantenimiento del filtro (CEPIS, 2005).

Los principales elementos en un FLA son:

a. Caja de filtración y estructura de entrada.
b. Sistema de drenaje.
c. Lecho filtrante.
d. Capa de agua sobrenadante.
e. Dispositivos para regulación, control y rebose.

Es sumamente importante la presencia de cada uno de estos elementos, así como su correcto diseño, operación y mantenimiento.

4.6.3.1. Sistema de distribución de caudal

La cámara de entrada se bifurca rápidamente en las entradas de los FLA, con dimensiones de 1 m x 1,45 m cada una. El diseño común de este sistema, cuando no se tiene un canal que le anteceda, se hace normalmente con canales que se extienden a lo ancho del filtro (Figura 4.2), al entrar el agua por esta sección, disminuye su velocidad y permite la medición del flujo a través de vertederos (CEPIS, 2005).

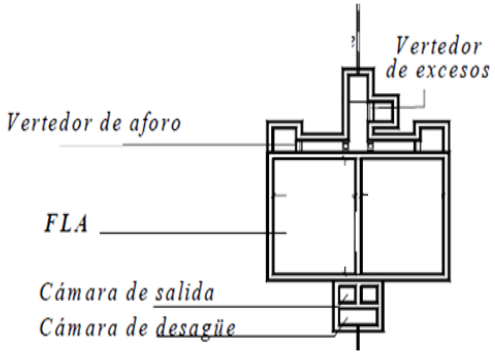


Figura 4.2. Esquema básico de un FLA.
Fuente: CEPIS, 2005.

Las entradas de caudal a las cajas filtrantes cuentan con compuertas, mas no con vertederos. Las compuertas de entrada se hallan corroídas, sucias y no ejercen correctamente su función, pues no cierran completamente el paso al agua, de modo que los operarios, les colocan bloques de cemento y arena para evitar la entrada de líquido (Figura A.7.33).

4.6.3.2. Cantidad de unidades

El tratamiento de agua por medio de la filtración lenta, debe contar con el mínimo de dos unidades paralelas, de modo que el tratamiento no se vea interrumpido por la limpieza o anomalías en uno de los filtros. La planta Quebrada Yugo posee dos filtros lentos en paralelo, descritos en la sección 3.6.2.

4.6.3.3. Acabado interior

Las superficies internas de las paredes de las cajas filtrantes en la planta, son rugosas tanto en el lecho del filtro, como en la cámara libre. Estas deben ser rugosas específicamente en el tramo donde se encuentran los estratos de arena y grava, para evitar cortocircuitos en el paso del fluido por el perímetro de la unidad. Pero en el espacio dispuesto para el agua, se recomienda que las paredes sean lisas para disminuir la adherencia de flora y microorganismos, lo que facilita su limpiado y retiro de impurezas.

4.6.3.4. Calidad Estructural

Los FLA no evidencian desgaste o defectos estructurales, como grietas o fisuras, que amenacen la integridad y funcionamiento de las unidades. Al igual la cámara de entrada y canaletas colectoras, se encuentran en buen estado.

4.6.3.5. Protección

Debido a que el acueducto se ubica en una zona montañosa, con árboles que colindan con la propiedad, y que los FLA no se encuentran techados, estos están expuestos a la intemperie y al acceso de animales. Siendo común la caída de hojas e insectos sobre la capa de agua de los filtros.

4.6.3.6. Independencia de filtros

Los filtros funcionan independientemente, cada uno posee válvulas, compuertas, y canaleta de recolección de efluente, propias. Esto permite que cada unidad opere por separado, y se pueda evaluar el filtrado de cada cual, además de poder realizar las tareas de limpiado correctamente. Sin embargo como se ha comentado, estas estructuras tienen serias deficiencias.

Al igual que el vertedero, las compuertas se hayan corroídas y poseen fugas. Las válvulas funcionan correctamente, pero las tapas de las estructuras que las resguardan, se encuentran agrietadas, o con desperfectos en su cierre, lo cual permite el paso de agua llovida, y ésta queda estancada dentro de las cámaras, pudiendo proliferar vectores de enfermedades. Sobre las canaletas se comentará más adelante, en la sección 4.6.3.11 sobre el control mínimo de salida.

4.6.3.7. Solera

La fuerza con la que entra el agua al lecho filtrante, puede provocar agujeros en la capa de arena, lo a su vez trae cortocircuitos, ya que el agua tenderá a pasar por este por la presión y espacio resultantes, socavando el tratamiento de filtración. Por esto es necesaria una solera, una estructura similar, o diseño especial.

En los FLA evaluados, la entrada de caudal se encuentra al nivel del lecho, de modo que la fuerza del agua es disminuida por la caída de 1,55m que posee la cámara de distribución de caudal, para entrar al filtro. Posee una solera de madera (Figura A.7.34), pero el alto de ésta, no es suficiente para evitar que se forme un hoyo en la arena con el caudal entrante. Esto se evitaría llenando el filtro con un caudal que no dañe el lecho, regulándolo con la compuerta, hasta que se alcance un nivel adecuado, o colocando una lámina de cerámica o madera paralela a la capa filtrante, que posea una cuerda o alambre en un extremo para que pueda ser luego removida, al iniciar la filtración.

4.6.3.8. Elemento de control de carrera filtrante

La carga hidráulica y velocidad de filtración disminuyen conforme avanza la carrera de filtración, hasta que en un momento dado la presión interna es mayor que la superficial, lo que invierte el flujo y eleva el nivel del agua en el filtro. Lo cual indica que la carga hidráulica disponible se acerca a cero y la carrera filtrante finaliza. Con el fin de realizar el control del avance del proceso, se debería colocar una regla graduada en la caja del filtro.

Para evitar el rebose y desacomodo del lecho, por nivelación de presiones, el FLA debe contar con un elemento de control, que indique cuándo la carga hidráulica disponible para operar se agotó, con el fin de desaguar el filtro. Los FLA de la planta poseen cada uno, dos aberturas de rebose a 0,30m del borde superior del filtro (Figuras A.7.35 y A.7.36). Pese a esto, éstas no corresponden con el elemento que indica el final de la carrera, ya que la carga hidráulica se agota antes de llegar a ese nivel, debido a la colmatación excesiva del filtro, que aumenta la presión de pasaje a través del estrato consumiendo gran parte de la carga.

4.6.3.9. Carga hidráulica disponible y capa de agua sobrenadante

La carga hidráulica en un filtro de altura variable, es calculada por la diferencia de altura entre el elemento que controla el nivel de salida del efluente, y el nivel máximo de operación. Y constituye la carga disponible para perder durante la carrera.

La carga hidráulica disponible es 1,70 m. Los vertederos de rebose de los FLA se encuentran a 2,50m y el vertedero de rebose de las canaletas a 0,80m. Sin embargo las unidades operan con el nivel máximo por debajo del correspondiente al de diseño, valor de 1,12m.

La capa máxima de sobrenadante refiere a la altura comprendida entre la superficie de la arena y el nivel al que se encuentran los reboses. Para los FLA del acueducto corresponde a 1,30m, altura que se encuentra dentro de lo estipulado para el diseño, que puede variar entre 1.0 y 1.50 m (CEPIS, 2005).

Debido a que el lecho presenta actualmente un desnivel hacia la tubería de lavado, la altura del sobrenadante no es constante en cada punto del filtro, siendo de 1,10m en la entrada del caudal y 1,30m en el lado opuesto, con una pendiente del 2%. La inclinación debería estar dada por la pendiente de la estructura y no por variaciones en la altura del lecho. Esto incide sobre el proceso de filtración, ya que la presión que ejerce el sobrenadante, permite tener una menor presión en el lecho, lo cual mueve el líquido hacia abajo.

De modo que si la altura del sobrenadante no es la misma en todos los puntos, se tendrá una mayor presión en unos con respecto a otros, creando vías preferenciales de filtración, lugar donde se colmatará más rápidamente el filtro. En este caso la presión excedente corresponde a 0,20m.c.a equivalentes a 1,96 kPa, 18 puntos porcentuales por encima de la presión experimentada a la entrada del FLA.

4.6.3.10 Drenaje

Un drenaje equitativamente distribuido, mantiene uniforme la presión y velocidad del agua en la base del lecho, permitiendo un progreso adecuado del proceso de filtración.

El drenaje de los FLA evaluados está conformado por una canaleta central de 0,25 m de alto, donde desagua el sistema de tuberías horizontales de $2^{1/2}$ ", tres a cado lado de la canaleta. La canaleta está cubierta por un conjunto de tapas de inspección, mientras que la piedra de soporte cubre las tuberías. El agua de la canaleta es recogida por la tubería de salida de 4" y llevada a la canaleta de recolección de agua filtrada.

El estudio certero de las características del soporte y del drenaje, solo puede hacerse retirándolos, lo cual solo amerita en los casos en que el filtro funciona anormalmente, y éste no corresponde a uno de esos casos. En el tiempo de servicio de los FLA de la planta, no se ha realizado el retiro de las capas para su limpieza y reacomodo, así como la limpieza e inspección del sistema de drenaje. Labor que debe ser llevada a cabo cuando se realice la reconstrucción del filtro.

4.6.3.11. Estructura de salida

Las estructuras de salida varían de acuerdo a los diseños de los filtros, pero debe contener al menos los elementos descritos a continuación.

a. Control del nivel mínimo de salida

Este control es necesario para el buen funcionamiento del filtro, para definir y mantener niveles de operación. Garantiza una altura mínima de sobre el lecho de arena, lo cual protege la capa biológica de la incidencia directa del sol y de la proliferación de algas. Evita que el sobrenadante desaparezca y escurra, en horas de máxima demanda o carencia de suministro.

El control de nivel mínimo de salida de los filtros, en la planta de la Sierra, está constituido por un sistema de canaletas colectoras del efluente, construidas en concreto (Figura A.7.39). Estas cuentan con un reservorio de 1 m de profundidad, y salidas a 0,80 m altura a la cual el agua rebosa hacia el tanque de cloración. La estructura original estaba conformada por las canaletas donde se deposita el agua filtrada, con salida y válvula para el retrolavado, reboses con vertederos, y una cámara que une los efluentes de cada filtro, con salida hacia el tanque de cloración.

b. Cambios en la estructura de las canaletas

Hace aproximadamente 16 años se les eliminó los vertederos a las canaletas de recolección de agua filtrada y se colocó en su lugar una tubería, que conduce el agua al tanque de cloración. Dejando así inutilizada la cámara de salida de las canaletas y suprimiendo la posibilidad de medición de caudal del efluente y velocidad de filtración, por medio de los vertederos (Figura A.7.39). Este cambió fue realizado por la ASADA, debido a que la caída del agua, provocaba mucho ruido, aunado al hecho que las canaletas se encuentran en un espacio cerrado, haciendo un ruido sordo. No obstante la instalación de tubería se realizó incorrectamente, pues el desnivel, y la presión del agua, devuelven el líquido por la misma, hasta la cámara donde se vertía originalmente el efluente de ambas canaletas, quedando ahí estancada. Esto resulta en el crecimiento de flora y microorganismos que forman una biocapa difícil de extraer.

A pesar que estas estructuras cumplen con la función de mantener la presión requerida para mantener el sobrenadante, mediante las columnas de agua descritas, poseen deficiencias importantes además de la mencionada. El fondo de las canaletas no posee un desnivel que facilite el lavado de las mismas y el material rugoso de las paredes, constituye un medio de soporte idóneo para la formación de capas biológicas.

Además la estructura no posee un elemento para cubrirla y resguardarla de suciedad, insectos y otros organismos, abundantes en el área, que entran sin importar que las canaletas se encuentren en una casetilla bajo techo -la misma donde está el control de turbiedad-, ya que se mantienen las puertas abiertas durante el día para el uso de los controles que ahí se encuentran. Esto hace que el agua filtrada, vuelva a contaminarse, sin tener ningún tratamiento posterior más que la cloración, por lo que los insectos y partículas de suciedad pasan directamente hacia la tubería de distribución, hasta los usuarios.

En el 2010 se realizaron dos cambios en la estructura de las canaletas, primero se cortaron las tuberías de salida que sustituyen los vertederos y luego se aumentó la altura de las paredes de las canaletas, esto último provoca serias consecuencias sobre el sistema con este último cambio.

Como se comentó anteriormente el efluente de las canaletas de flujo ascendente, colectoras del agua filtrada, se enviaba directamente al tanque por tubería, y debido a la presión se presentaba constantemente una pequeña fuga en la cámara donde se encontraban los tubos. Esta fuga provocaba el crecimiento de musgo acompañado de agua estancada. Debido al peligro de proliferación de vectores de enfermedades que esto supone, se concienció a los operarios al respecto, y por su propia iniciativa retiraron los tubos y se dejó en caída libre dentro de la pila donde luego se colecta con tubería de 4" (Figuras A.7.54 y A.7.55).

En diciembre del 2010 se instalaron cuatro tanques de almacenamiento con una capacidad de 22 m^3 cada uno (Figura A.7.56), para que fueran llenados con el agua provenientes de las canaletas. Se colocaron casi a nivel del terreno, por lo que cuando los tanques se llenan aumenta tanto la presión del agua que ocasiona un flujo inverso en el intento de compensar la diferencia de presión.

El fontanero advirtió que esto sucedería, sin embargo se siguió con la instalación. De modo que para solucionarlo, la ASADA aumentó al doble la altura de las paredes externas de las canaletas para evitar que el agua se desbordara, complicando el acceso a las canaletas y alterando el diseño y funcionamiento de las mismas. Ya que se eliminó la independencia de ambas canaletas, el rebose de las mismas, el sistema de paso del agua de las canaletas a la cámara común y la posibilidad de realizar mediciones de velocidad de filtración por aforo, porque al subir el nivel se llena completamente toda la estructura por encima de los vertederos.

Aunque este cambio se llevo a cabo por la facilidad y ahorro económico que suponía, al compararse con la solución de escavar en el terreno para colocar los tanques, las consecuencias hidráulicas que supone son muy serias.

Aumentar el nivel de salida del efluente de los FLA incide gravemente sobre carga hidráulica disponible de los filtros, ya que la diferencia entre el nivel del rebose de los FLA y del rebose de su efluente es mucho menor, disminuyendo la carga disponible, lo cual acorta las carreras de filtración. Asimismo se altera la dinámica hidráulica de la filtración, ya que el nivel de agua filtrada supone una mayor presión a la salida del filtro, cuando el principio de funcionamiento del sistema es que la disminución de presión en la base del filtro con respecto a la presión del sobrenadante, impulse el agua a través del filtro, sin embargo ahora se presenta una resistencia al paso del líquido y por ende a la filtración.

Por estas razones se debe volver las canaletas a sus condiciones anteriores e invertir en la excavación de una base más profunda para los tanques de almacenamiento.

c. Interconexión de unidades

Los filtros requieren ser llenados de manera ascendente, para eliminar el aire acumulado en el lecho y para realizar el retrolavado. Esta acción se debe realizar con agua filtrada para no contaminar el medio filtrante. Por esta razón es imperativo que exista una interconexión entre filtros, para que se pueda utilizar el efluente de uno en el llenado del otro, tal y como sucede en los FLA del acueducto de La Sierra. Los filtros cuentan con un sistema de interconexión subterráneo que les permite intercambiar el efluente y utilizarlo para los fines mencionados.

d. Control de nivel máximo de operación y desagüe de fondo de filtro

Los FLA de la planta tienen cada uno dos aberturas para el rebose del filtro, cuando el nivel del sobrenadante aumenta por encima del nivel máximo de operación, al llegar el final de la carrera. Éstos se encuentran a 0,30 m de la superficie de la estructura, con un diámetro de 4”, conectadas al sistema de drenaje superficial (Figuras A.7.35 y A.7.36). No obstante no coinciden con el nivel del sobrenadante cuando se ha consumido la carga disponible, al final de la carrera. Debido a que los filtros se colmatan a una altura de sobrenadante menor, por las condiciones actuales del lecho, el cual se encuentra sobrecargado de materia orgánica.

Las unidades también cuentan con un sistema de desagüe de fondo de filtro, que permite descartar las aguas filtradas.

4.6.3.12. Espacio para transitar y realizar la limpieza

Los FLA deben contar con bordes anchos para que facilite el paso de los operarios para su mantenimiento. Las paredes de los FLA evaluados poseen bordes de 0,20m de ancho, por donde los operarios transitan sin problemas. Empero ofrece riesgo en momentos de emergencia, como sismos, ya que las paredes quedan hasta 4m del suelo, pudiendo los operarios desestabilizarse y caer. Debería colocarse una serie de verticales como se hizo en los desarenadores, que permitan sujetarse a los operarios.

4.6.3.13. Área de lavado de arena

Cada filtro posee un área de lavado de arena, donde se coloca la arena sucia retirada del FLA, se lava con agua cruda y se deja secando para luego ser utilizada para remplazar la arena sustraída. Esta área es techada lo cual protege la arena de la caída de hojarasca, pero al ser abierta, se encuentra expuesta al acceso de animales y de la lluvia cuando no precipita perpendicularmente. Las paredes se encuentran tapizadas con un musgo naranja típico de las zonas húmedas (Figura A.7.81).

Esta área carece de trampas para la arena y de un recuperador de la misma. Solamente posee un desagüe sencillo (Figura A.7.82). En el canal de salida se encuentra gran cantidad de estrato sedimentado, evidenciando la continua pérdida del mismo. Esto no solamente es importante por aspectos económicos sino por la eficiencia del proceso de filtración, ya que al lavar la arena, junto con la suciedad también se eliminan los elementos más finos del estrato, necesarios para retener microorganismos y sólidos muy pequeños.

Construir estas estructuras faltantes eliminaría la pérdida gradual de este insumo, traduciéndose en beneficios económicos a largo plazo, en ahorro de compra de arena y en el mantenimiento de la eficiencia de los FLA.

4.6.4 Tanque de cloración

El tanque de contacto construido en concreto, posee una capacidad de 215m^3.

4.6.4.1 Entrada de caudal

El tanque de cloración recibe el agua filtrada a través de una tubería de 4" (Figura A.7.46), con presión variante, relacionada con la velocidad de filtración de los FLA.

4.6.4.2 Accesos para mantenimiento e inspección

El tanque de cloración cuenta con una única entrada para acceso del personal, que coincide con la entrada del caudal, en una de las esquinas de la estructura (Figura A.7.46).

Lo anterior imposibilita realizar inspecciones diarias de otros puntos del tanque y dificulta las labores de limpieza y mantenimiento. Además que la pared de entrada carece de peldaños o apoyos para subir y bajar al tanque.

4.6.4.3 Salida del caudal hacia tubería de distribución

La tubería de salida del tanque de cloración constituye el último elemento de la planta de potabilización, y se conecta directamente con la tubería de distribución. La salida cuenta con una válvula mariposa de cierre y regulación del caudal efluente.

La entrada y la salida de caudal en una estructura, deben posicionarse en lados opuestos, con el fin que el recorrido del fluido sea máximo y se eviten cortos circuitos. No es así, en el tanque de contacto de la planta evaluada, ya que la salida se encuentra en la pared adyacente a la entrada, dejando zonas muertas y propiciando los cortos circuitos. El diseño del tanque de cloración, "*debe procurar obtener el máximo rendimiento hidráulico, de modo que el tiempo real de residencia se aproxime al tiempo nominal Q/V, con un mínimo de espacios muertos y con un flujo de características próximas al ideal flujo de pistón.*" (CEPIS, 2004)

Las defiencias de diseño del tanque de contacto cobran mayor relevancia, al considerar que el fin de la estructura es permitir el contacto uniforme y adecuado del desinfectante con la masa de agua, de modo que se eliminen microorganismos nocivos, principalmente. Así que estas deficiencias se traducen en el nivel de remoción de agentes patógenos y en la calidad del agua de consumo.

Otro error en el diseño reside en que el tanque posee un desnivel hacia el lado contrario de la salida, repercutiendo sobre la velocidad, las líneas de flujo del agua y las labores de lavado.

4.6.4.4 Lavado

La tubería de lavado se encuentra junto a la de salida, pero desemboca en una canaleta al lado de la carreterra. A través de una válvula mariposa se permite el cierre y regulación del caudal.

El desnivel en una estructura posee el fin de guiar el movimiento del fluido hacia un punto o dirección, por lo que resulta paradójico la colocación del desnivel hacia el lado contrario del lavado, razón por la cual se dificulta la limpieza del tanque.

4.6.4.5 Rebose

El rebose del tanque de cloración permite evacuar el agua por encima del nivel de opereción. Éste se ubica junto a la salida de lavado, y la de distribución.

4.6.4.6 Tiempo teórico de retención

El tiempo de contacto teórico se obtiene al dividir el caudal efluente entre el volumen del tanque.

$$T= A/Q$$

$$T= 9mx8,70x3,20m/64m3h-1$$

Donde,

T: tiempo de contacto en horas.

Q: Caudal (m3/h).

A: Área del tanque de cloración.

El tiempo teórico de contacto en la estructura, es de 3,92h. Sin embargo los problemas de diseño comentados, no aseguran el cumplimiento real del mismo, teniendo serias repercusiones sobre la eficiencia de la desinfección.

El tiempo de contacto, es un aspecto sumamente importante en el tratamiento de potabilización, y más aún en el acueducto de La Sierra, ya que la primera conección en la tubería de distribución, se encuentra a escasos 300m de la planta, correspondiente a un establecimiento comercial de ventas de comidas. El tiempo real no fue posible determinarlo debido a que la condición crítica de disponibilidad de agua para la población, hizo incoveniente realizar la prueba de trazadores, con la cual el agua con trazador debe ser desechada.

4.6.4.7 Ventilación

El tanque de contacto posee un único tubo de ventilación, ubicado en la superficie en forma de cuello de ganso, haciendo necesaria la presencia de otras salidas para evacuar gases, como el hidrógeno generado en la producición de cloro *in situ*.

4.6.4.8 Protección de accesos

El acceso al tanque se encuentra dentro de la casetilla de cloración, tiene una tapa de hierro para protegerlo y una base protectora de cemento de solamente 5cm sobre el nivel del suelo (Figura A.7.47), que evita el paso de líquidos, que pudieran encontarse en la casetilla. La base de hierro complementaria a la tapa, hace un cierre externo alrededor de la misma, protegiendola también de filtraciones.

La tapa no posee otra protección adicional. En cambio la casetilla se mantienen cerrada bajo llave, mientras no se encuentre el personal en el acueducto.

A un lado de la tapa de acceso, se realizó un corte en la base para colocar los tubos de alimentación de las bombas, dejando un espacios abiertos y dañando la estructura. La tapa y la base se encuentran sumamente corroídas y desgastadas (Figura A.7.47).

4.6.5. Sistema de desinfección final

4.6.5.1. Dependencia del tratamiento en la desinfección

El tratamiento efectuado en la planta Quebrada Yugo, para obtener agua de calidad potable, apta para el consumo, depende principalmente de la operación y eficiencia de la filtración lenta. Cada etapa del tratamiento es importante, pero en la FLA, recae la función principal, siendo entonces ésta la etapa de tratamiento esencial, sin la cual no puede avanzar el proceso. Los FLA proveen el tratamiento de desinfección primario, al eliminar partículas, microorganismos y trasformar sustancias, principalmente, acondicionando el agua para la desinfección final.

En un sistema de potabilización, la remoción de contaminación no debe recargarse sobre la desinfección final, ya que ésta solo constituye una barrera de seguridad, que aunque siendo indispensable, no es capaz de producir per se, agua potable –exceptuando agua libre de contaminantes fisicoquímicos y microorganismos altamente resistentes-.

La eficiencia y eficacia de este proceso, depende de los resultados en los procesos anteriores, para que el agua obtenga las características requeridas, y el proceso de desinfección final se desarrolle correctamente y no se generen consecuencias adversas.

4.6.5.2. Características del sistema de aplicación

Una aplicación adecuada debe contar con al menos cuatro condiciones (CEPIS, 2004):

a. El cloro debe distribuirse de manera uniforme en toda la masa de agua mediante un difusor (Figura 4.3).
b. El difusor debe instalarse inmediatamente antes de un resalto hidráulico.
c. Los orificios del difusor deben encontrarse totalmente sumergidos.
d. La dosificación debe ser continua.

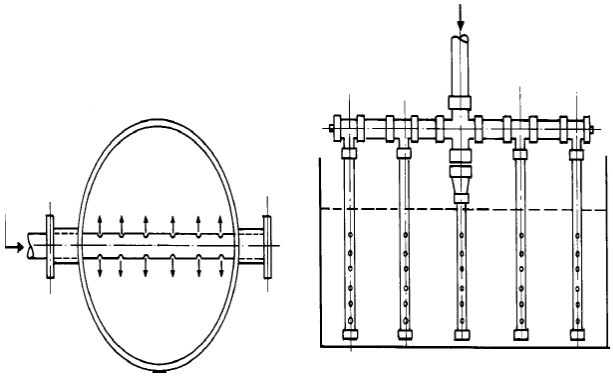


Figura 4.3. Estructura de un difusor en una tubería y en un canal, respectivamente. Tomado de CEPIS, 2004.

No obstante la aplicación del biocida en la planta no cumple con ninguna de las condiciones anteriores.

El proceso de formación de cloro *in situ* se lleva a cabo en dos estañones plásticos de 250 L (Figura A.7.43), donde a cada uno se le adiciona agua y nueve kg de sal común (cloruro de sodio), para ser disociada por la acción del electrodo (Figura A.7.42), durante doce horas.

Este tiempo se programa en el control del sistema (Figura A.7.41), que posterior a esto se desconecta automáticamente. Los estañones de producción de cloro, son alimentados mediante un ramal, de la tubería saliente de las canaletas.

La disolución de cloro formada por electrólisis es aplicada mediante goteo por gravedad, con un flujo de 350 ml/min. El sistema de dosificación consiste en una serie de tubos de PVC colocados en la parte inferior de los dos tanques de producción de cloro, llaves de paso y la unión de ambas salidas en un tubo común que se encuentra suspendido sobre un colector de plástico, colocado a nivel del piso. El fondo de este colector posee un pequeño orificio salida directa al tanque de cloración, ya que la casetilla de desinfección se ubica sobre el tanque de contacto (Figura A.7.44).

La disolución gotea por el colector y es llevada al tanque por un tubo vertical de escasos diez centímetros, que no llega a penetrar la masa de agua, porque ésta no se eleva hasta ese punto, constituyendo entonces una aplicación aérea.

Los operarios miden el flujo en la salida del tanque donde se encuentra la disolución, ya que el tubo de goteo, no está fijo al colector, diseñado de este modo para permitir el aforo. Sin embargo este sistema no es el adecuado, no sólo por la seguridad del operario, sino también por el efecto corrosivo del gas hidrógeno, formado en el proceso, teniendo efecto sobre la tapa del tanque de cloración, las llaves de paso de hierro y el panel de control/rectificador de producción de cloro. El tubo dosificador se encuentra cercano a la entrada del efluente. Este último debe realizar una caída al tanque, debido a que la tubería finaliza en la parte superior del mismo, prolongándose solamente 12 cm horizontalmente (Figura A.7.46). Empero esa caída no es suficiente para provocar la turbulencia requerida para que desarrolle una mezcla adecuada entre el agua y el desinfectante, aunando a la carencia de difusor y de una aplicación área.

La ausencia de un salto hidráulico no solo repercute sobre la calidad de la mezcla, sino sobre el proceso de desinfección en sí, ya que no se asegura el contacto del cloro con la totalidad de la masa de agua. La turbulencia es necesaria también para desestabilizar los aglomerados celulares, ya que los microorganismos que se encuentran en el interior pueden quedar inmunes a la acción del biocida. Esto se agrava al tomar en cuenta que el diseño del tanque de cloración da pie a la existencia de cortos circuitos y zonas muertas.

Dadas estas condiciones no se puede asegurar la obtención de una mezcla homogénea en el tanque de cloración, por lo cual se deben realizar cambios en el dosificador y entrada de caudal para que cumplan con las características señaladas.

4.6.5.3. Cambio en el sistema de generación de cloro y dosificación

Dada la corrosión del panel de control/rectificador Sanilec 6, la ASADA adquirió un nuevo sistema de generación de cloro *in situ*, marca Easy Clor 6, y se cambiaron los tanques de plásticos por otros de mayor capacidad, pasando de 250L a 450L (Figuras A.7.60 a A.7.62)

El nuevo sistema utiliza 12kg de cloruro de sodio, y 12h de proceso para obtener una disolución de cloro, con 2 kg de cloro libre.

El sistema de dosificación por goteo se cambió por un sistema eléctrico que utiliza una bomba para tal fin, con dosificación regulable. Por lo que no es necesario el control del goteo manualmente, así que la entrada de la dosificación al tanque se instaló de manera fija (Figura A.7.62). Su desventaja consiste en la dependencia del suministro eléctrico para ejercer su función, dejando paralizado el sistema en caso de corte eléctrico.

Además la dosificación de la disolución de cloro que antes era continua ahora no lo es, se elimina completamente durante la noche, por indicaciones de la empresa encargada de la instalación, para evitar agregar cloro en exceso, por la baja en el consumo de agua. Sin embargo éste no es nulo, es decir, aunque disminuye, si se presenta un consumo, por lo que se requiere regular la dosificación de acuerdo a esto, y no suspenderla pues se está comprometiendo la calidad del agua producida.

Debido a que se desconoce el flujo de dosificación, ya que el sistema no lo indica. No es posible determinar la cantidad de cloro agregada al sistema. Solamente se está regulando con base en los resultados de cloro residual libre. CEPIS (2004) no recomienda su uso, debido a su elevado costo, requerimientos de energía eléctrica o hidráulica y sobre todo, a la dificultad de encontrar mano de obra y mantenimiento adecuados.

4.6.5.4. Las características de la caseta de cloración

La casetilla de cloración es exclusiva para esta operación, que por los cuidados requeridos debe ser de este modo, para que no interfiera la presencia de elementos ajenos al proceso (Figura A.7.40).

Posee ventilación en dos de las paredes de la estructura, además de celosías en las otras dos. La ventilación es necesaria para disipar los vapores de H_2 producidos, y evitar el peligro que permanezcan confinados en el lugar.

La casetilla cuenta con dos tanques para la preparación de la disolución de cloro, número mínimo para asegurar la continuidad del dosificado, ya que permite preparar la salmuera y la disolución en el tanque libre, antes que se acabe el contenido del recipiente en uso.

En la estructura se encuentran los insumos requeridos para la cloración, tal como agua limpia proveniente de la filtración, sal y suministro eléctrico. La instalación eléctrica presenta cables no entubados y conexiones inapropiadas, cubiertas con cinta eléctrica (Figura A.7.45).

4.6.6. Coincidencia entre las obras existentes y los planos

La ASADA carece de los planos constructivos del acueducto, y no fue posible obtenerlos. Empero por la importancia de contar con ellos, el comité debe velar por tenerlos en su poder.

4.7. Sistema de distribución

El sistema de distribución de agua potable es de suma importancia, ya que además de tener que cumplir con las condiciones físicas e hidráulicas requeridas para llevar el líquido hasta el hogar del consumidor, debe guardar la integridad del agua, de modo que su calidad permanezca intacta.

Las tuberías deben estar libres de fugas, desperfectos y de biofilms, que causean contaminaciones posteriores. También es importante el control factores secundarios que propicien la proliferación microbiana en el agua, en la distribución y almacenamiento, conocido como rebrote. Dentro de estos factores se puede nombrar temperatura, oxígeno, pH, cantidad y tipo de nutrientes, concentración residual de desinfectante, tiempos largos de almacenamiento y material de las tubería.

Las especies de *Enterobacter y Klebsiella* colonizan las superficies internas de tuberías tanques de almacenamiento y forman una biopelícula cuando los factores secundarios condiciones son favorables (ALLEN citado por Marchand, 2002).

Como se comenta en la sección de demanda de cloro, la tubería se encuentra en buenas condiciones, carente de fugas y contaminaciones, manteniendo constante el cloro libre, a través de todo su recorrido.

La tubería de suministro de agua potable varía el diámetro dependiendo de la zona en la se encuentre y el tipo -tubería primaria o secundaria-. Parte del sistema se encuentra subterráneo, mientras que otro está expuesto en la superficie. También cuenta con elementos como quiebra gradientes y tanques de almacenamiento, con nueve y seis estructuras respectivamente.

La red de distribución es de material de Policloruro de Vinilo (PVC), que constituye el material recomendado para estos fines. Pero en algunas zonas, la tubería domiciliar de conexión del usuario -la cual no pertenece al acueducto- es de manguera, provocando constantes averías y fugas. Los vecinos que presentan este problema -dieciocho en total- se han resistido a cambiarla, debido a los costos, trayendo problemas en la tubería madre.

El diseño de este sistema se encuentra guiado por la gravedad, para que sea ésta, la fuerza motriz que impulse el fluido. Solamente en la zona de La Paz, es necesario llevar el agua por medio de una bomba.

En otros lugares la presión y gravedad del agua no es suficiente para llegar al consumidor. Por esta razón se han tenido problemas de abastecimiento, y al conceder el derecho de agua en estos lugares, no solo se le está vendiendo un mal servicio al nuevo abonado, sino que se compromete el suministro del resto de consumidores que se localizan en estas zonas vulnerables. Así que se requiere llevar a cabo un estudio de las condiciones del lugar, antes de realizar una nueva conexión, para determinar si son adecuadas o no.

También es imperativo evaluar la capacidad de producción del acueducto, la demanda, su capacidad de satisfacción, así como posibles cambios para aumentar el suministro, como aumento de diámetro en la tubería. Esto último aumentaría el caudal, y evitaría el desperdicio de agua, por rebose de tanques de almacenamiento.

4.8. Tanques de almacenamiento

Los tanques de almacenamiento deben reunir una serie de requisitos con el fin de mantener la calidad del agua, permitir el control, inspección y lavado, además de encontrarse protegido contra extraños (Figura 4.4).

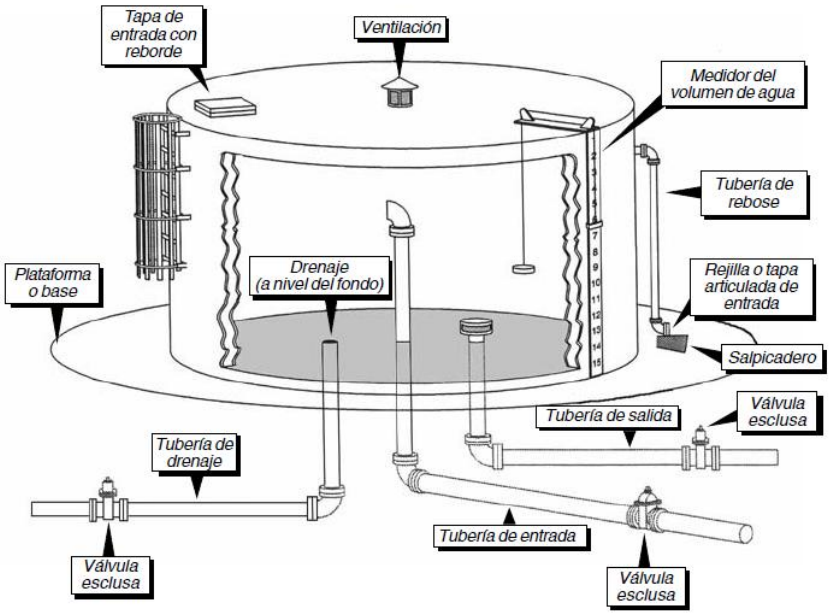


Figura 4.4. Los elementos esenciales en un tanque de almacenamiento de agua potable. Fuente: CEPIS et al, 2001.

La mayoría de los tanques de almacenamiento poseen una malla perimetral, acceso vedado con candado, y tapas aseguradas con candado también, como barreras de seguridad para evitar el acceso de extraños (Figuras A.7.48 a A.7.51).

Los tanques de La Paz se encuentran desprotegidos, aunque no se localizan al margen de la carretera como sus semejantes, sino en medio del talud de la ruta 2, rodeados con vegetación, son fácilmente accesibles, pues sólo tienen una cerca de alambre con un extremo corredizo, y las tapas no cuentan con sistema de cierre.

4.9. Manejo domiciliar del agua

El manejo del agua por parte del usuario, es el último paso que repercute sobre la calidad del líquido, pudiendo mantenerla o cambiarla. En la mayoría de abonados del acueducto, este cambio es para mal, pues tal vez sin saberlo, menoscaban la calidad del agua que consumen.

Muchos de los usuarios tienen tanques de almacenamiento de agua en sus casas, sin embargo la mayoría de éstos no son herméticos, están hechos de materiales inadecuados, ni cumplen con las normas básicas de higiene y mantenimiento (Figuras A.7.66 a A.7.71). Lo cual expone la salud del consumidor, por la proliferación de vectores de enfermedades en el agua de bebida. Por eso se recomienda a la ASADA realizar recomendaciones a estos usuarios, e informales del peligro para la salud que significa estas prácticas de almacenamiento de agua. Siendo útil la entrega de un panfleto informativo junto con el recibo de pago de servicio.

También es común la utilización de telas, plásticos y otros elementos, en la salida de los tubos, lo cual es perjudicial debido a que albergan y proliferan microorganismos, además que dificultan el mantenimiento de los grifos. Aunque en la mayoría de casos observados, no se acostumbra a limpiar estos sistemas, pues se encontraron tubos sucios, con biocapas debidas al crecimiento microbiano.

4.10. Medidores de consumo

Los medidores de consumo deben estar ubicados en lugares estratégicos y accesibles, con el fin que tanto su lectura como mantenimiento se vean facilitadas. No obstante la instalación de estos aparatos registradores, no sigue un ordenamiento, por parte del acueducto, encontrándose en espacios inadecuados, situación que será tratada en detalle en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO V

EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN, MANTENIMIENTO Y CONTROL DE CALIDAD

CAPÍTULO V
EVALUACIÓN DE LA OPERACIÓN, MANTENIMIENTO Y CONTROL DE CALIDAD

5. Evaluación de la Operación, Mantenimiento y Control de Calidad

La eficiencia de los FLA y del sistema de cloración, depende en gran parte de las labores de operación, mantenimiento y control que se les brinda, y estos a su vez dependen del conocimiento técnico del operador, así como la disposición y uso adecuado de herramientas y materiales (Espinoza, H., 1984). Así para obtener un tratamiento de filtración lenta y desinfección eficientes, se deben establecer las condiciones óptimas de funcionamiento y mantenimiento, de modo que se aprovechen las fortalezas del tratamiento y se controlen sus debilidades. A la vez que se realiza la evaluación de estos aspectos, se intercalan las recomendaciones. La información recabada se base en observaciones participativas, con guías de observación, y datos brindados por los operarios.

5.1. Operación y Mantenimiento

La operación y el mantenimiento de un sistema de potabilización, son aspectos decisivos para el éxito del tratamiento, ya que no sólo se requiere un buen diseño y construcción de las estructuras para ello. Se requiere también de personal adiestrado, con conocimiento técnico y habilidad para hacer funcionar bien la planta y los sistemas de conducción y distribución, mantenerlos en buen estado, verificar la calidad del afluente y efluente, además de solucionar cualquier contratiempo relacionado, sin dejar de lado la atención requerida en el resto del sistema.

La intensidad de las labores de operación y mantenimiento depende del clima, en la estación lluviosa se aumenta, ya que la alta turbiedad demanda una limpieza y control más frecuente de todo el sistema. Mientras que en época seca se disminuye y se aprovecha para realizar actividades menos frecuentes como el lavado a fondo de los FLA, pintar las estructuras y el mantenimiento de las instalaciones anexas.

5.2. Personal

El personal de la planta está constituido por un fontanero, el Sr. Heriberto Leiva Romero y su ayudante el Sr. José Asdrúbal Araya Trejos.

El fontanero es una persona muy proactiva, consciente de la importancia de brindar calidad de agua potable a los usuarios, de realizar mediciones adecuadamente y llevar a cabo acciones correctivas cuando se presentan situaciones de emergencia. Es muy consciente de las consecuencias sobre la salud que provoca el suministrar agua contaminada o incorrectamente potabilizada a las comunidades, así como de la responsabilidad legal que posee como operador de la planta. Es muy comprometido y apasionado con su trabajo, y lo percibe como una misión de responsabilidad personal y no sólo como un deber impuesto.

El Sr. José tiene un año y medio de laborar en la planta, anteriormente trabajó en un vivero.

5.3. Condiciones laborales

El Sr. Heriberto se encontraba laborando bajo la modalidad de contratación, sin goce de garantías sociales como pago de aguinaldo, horas extra, vacaciones, seguro laboral, etc. Debido a la cantidad de trabajo se resolvió que él contratara a un ayudante, al cual debía pagarle salario y seguro laboral. Hasta el mes de diciembre del 2010 la ASADA cambió esta situación laboral, sin embargo no se realizó el pago retroactivo, y no se incluyó el pago de horas extra y costos de trasporte.

Debido a que solamente el fontanero posee los conocimientos para la administración del sistema, éste no puede estar ausente en ningún momento, por lo cual nunca ha contado con vacaciones. Es imperativo que la ASADA incluya al menos otra persona capacitada, para poder cubrir los requerimientos del acueducto.

También se deben realizar cambios para brindar mejores condiciones de trabajo y de ambiente laboral. Entre ellas se encuentra habilitar un espacio para que los trabajadores puedan calentar su almuerzo, prepararse bebidas calientes sumamente importantes debido al frío tan extremo que puede llegar a experimentarse en las instalaciones. También se debe proveer agua potable para su consumo, ya que el agua en el centro de reuniones ubicado en la planta, proviene del caudal entrante al sistema.

5.4. Tareas del personal

El mantenimiento y operación del sistema de agua potable en su totalidad, depende de estas dos personas, desde labores en las tomas hasta en las conexiones domiciliares. Sus responsabilidades son muchas, por lo que la cantidad de personal no es suficiente para cubrirlas, siendo muy agotador para solamente dos personas. Incluye:

a. Inspección del sistema de potabilización.
b. Despejar los ductos de las tomas de materiales atascados.
c. Atención de fugas en las tuberías.
d. Reparación de daños en el sistema y traslado de materiales necesarios al sitio.
e. Mantenimiento de las zonas verdes de la planta y de las estructuras anexas (tanques de almacenamiento y quiebra gradientes).
f. Instalación de accesorios en las tuberías.
g. Construcción y/o instalación de estructuras nuevas.
h. Limpieza del sistema de potabilización.
i. Lectura de medidores de consumo.
j. Conexiones nuevas, desconexiones por morosidad y reconexiones del servicio.
k. Control de bombas y nivel de tanques de almacenamiento.
l. Toma de muestras para análisis en laboratorio.
m. Control y supervisión del equipo de medición de turbiedad y cloración.
n. Preparar las mezclas de salmuera.
o. Medición y control turbiedad y cloro residual libre.
p. Manejo del sistema automático de turbiedad y alimentación de la planta (desvío de caudal con alta turbiedad).
q. Compra de equipo, materiales e insumos requeridos; colocación y orden de éstos en bodega.
r. Informar a la ASADA de la situación del acueducto.
s. Envió de notificaciones de la ASADA a los abonados.
t. Atender emergencias de vecinos relacionadas al suministro de agua.
u. Atención de visitantes del acueducto.
v. Lavado de los automóviles de la ASADA.

5.5. Capacitación del personal

El Sr. Heriberto posee preparación como fontanero en el INA, y conocimientos sobre la potabilización, las directrices de operación y mantenimiento de la planta, brindadas por parte del AyA cuando se construyó el sistema. También cuenta con conocimientos en muestreo brindados por el personal del CEQIATEC y con capacitaciones en la empresa AMANCO. Mucho de su conocimiento y sentido de responsabilidad en su labor, lo ha adquirido empíricamente e indirectamente con el personal del AyA en sus visitas iniciales.

Sin embargo carece de instrucción en la programación del panel de control del sistema de turbiedad, y la calibración de este equipo. Ha trabajado en la planta durante diecisiete años, y trabajó en la construcción del sistema, siendo una ventaja para comprender su funcionamiento.

En cuanto al Sr. José, su conocimiento actual del acueducto es muy básico, adquirido del Sr. Heriberto, se limita a realizar labores guiadas por el fontanero, y expresa que no cuenta con los conocimientos para manejar la planta, pero que tampoco forma parte de sus pretensiones laborales.

5.6. Manual de operación y mantenimiento

La ASADA no posee manual de operación y mantenimiento de las instalaciones y equipo del acueducto, las instrucciones respectivas fueron dadas en forma oral por el AyA -encargados del diseño de la planta e instalación del equipo-.

5.7. Control de calidad

El control de calidad realizado diariamente consiste en la medición de cloro residual libre y la vigilancia de los valores de turbiedad del caudal entrante a la planta y del efluente de los FLA, el primero por medio de equipo automático y el segundo visualmente (Cuadro 5.1).

El sistema de medición de turbiedad es alimentado con agua cruda, realiza mediciones continuas de este parámetro, permitiendo el paso de agua con valores picos de turbiedad de hasta 100 UNT, desviando el agua que presenta valores mayores y volviendo a permitir el paso cuando los niveles disminuyen a 30 UNT.

La turbiedad del agua filtrada se controla tomando agua proveniente de la canaleta, con un recipiente de vidrio y contrastándolo a la luz, se determina si se encuentra aceptable o no (Figura 5.1.). Esto es a criterio propio del fontanero, quién indica que el agua debe ser transparente sin sólidos suspendidos, de no ser así se descarta, evitando que pase a la cloración y al consumidor. Esta determinación debería llevarse a cabo con un instrumento adecuado como la columna de turbiedad, para no depender de la percepción humana, que puede variar.

Cada seis meses se toman muestras del agua producida por la planta, con el fin de realizarle análisis microbiológico de coliformes totales y fecales, por parte del CEQIATEC. Para tomar la muestra se utiliza la bolsa de plástico aséptico proporcionada por el laboratorio y llevada en hielera hasta el ITCR.

Adolece el control y seguimiento de los parámetros complementarios del nivel 1, que de acuerdo al Reglamento de la Calidad del Agua Potable deben ser hechos cada mes, a saber, olor, sabor, color y turbiedad.

Aunque dicho reglamento solamente indica la necesidad de estos análisis por ser una población servida menor a 10 000 habitantes, dadas las características del agua cruda, del sistema de potabilización y las serias consecuencias sobre la salud, se deben llevar a cabo mediciones diarias de temperatura, pH y turbiedad. Debido a que estos parámetros influyen directamente sobre la eficiencia de la filtración y de la cloración, como se discutió en el capítulo anterior.

Asegurar que la calidad del agua potable solamente se rige por los parámetros impuestos por el nivel de control correspondiente en el Reglamento de la Calidad del Agua Potable, es ignorar la importancia cultural, social y comercial del agua, así como su gran repercusión sobre la salud del ser humano, ya sea para su bienestar o detrimento. Esto último debido a que es un vehículo de dispersión de microorganismos patógenos y sustancias tóxicas, que puede llegar a un grande número de personas, pudiendo afectar poblaciones enteras y colocarlas en estado de emergencia.

Cuadro 5.1. Análisis de control de calidad del sistema de potabilización Quebrada Yugo.

Análisis	Método	Puntos de muestreo	Instrumento o equipo	Frecuencia	Encargado
Turbiedad	Nefelométrico	Tubería de afluente de la planta	Turbidímetro automático marca GLI International, Modelo 8324	Continua	Heriberto Leiva
	Visual	Canaletas de agua filtrada	Recipiente de vidrio trasparente	Diaria	Personal de la planta
Cloro residual libre	DPD	Salida tanque de cloración	Kit marca HACH, modelo CN-66 Cat. No. 2231-01 cloro libre y total.	Diaria	Personal de la planta
		Escuelas, EBAIS, Soda "Fiesta la Manzana", puntos más alejados de la red.		Mensual	
Coliformes totales y fecales	NMP	Salida del tanque de cloración	Materiales y equipo de laboratorio para NMP	Semestral	Toma de muestra: personal de la planta. Análisis: CEQIATEC

Así también es necesario controlar la calidad química del líquido, con análisis del nivel 3 y 4, por contaminaciones eventuales, principalmente cuando la planta se alimenta con la quebrada y con el río El Yugo, por el impacto de las actividades humanas sobre estos cuerpos de agua.

5.8. Bitácora de la planta

La ASADA no lleva una bitácora de la situación del acueducto, solamente el fontanero registra en una libreta de uso personal los resultados de cloro residual libre y el lugar de muestreo, si es una escuela o un EBAIS pide la firma del encargado, luego de mostrarles el resultado.

Este es un instrumento de control indispensable tanto para tener un registro oficial que respalde el accionar de la Asociación, como para realizar estudios de las condiciones del agua potable y de calidad, correlacionar parámetros de funcionamiento. Por esto es importante anotar diariamente los siguientes aspectos:

a. Las labores realizadas por el personal (conexiones u desconexiones, reparaciones, lectura de medidores, limpieza, etc).
b. Control de turbiedad, cloro residual libre y otros análisis (encargado, lugar de muestreo, resultados, observaciones).
c. Duración de las carreras de filtración, formación de capa biológica,
d. Observaciones como: cambio de la fuente de suministro de agua, parada del sistema por situaciones de alta turbiedad, instalación de equipo nuevo, construcción de estructuras, entre otras.
e. Tareas por hacer.

También es necesario llevar un registro de manejo financiero, inversiones, asuntos y decisiones tratados en las reuniones de la ASADA. Así como archivos con quejas de consumidores, disconformidades, reportes de análisis externos, planos, manuales, etc.

5.9. Descripción de Equipo y recursos

El equipo que posee la ASADA consiste en el Turbidímetro automático “Steady Stream 4 High-range Turbidimeter System” marca GLI International, Modelo 8324, el panel de control de las válvulas del sistema, válvulas automáticas y manuales, y el sistema de producción de cloro *in situ*, marca Sanilec 6 Eltech.

Las acciones de operación de los primeros dos equipos se relacionan con el control del afluente de la planta, que se tratará más adelante, y consisten en:

a. Conectar/desconectar el equipo.
b. Regulación de caudal de entrada al muestreador, con la llave de paso.
c. Control de modo de operación (manual, automático, fuera).
d. Vigilancia de lecturas de turbiedad.
e. Inspección de situación de válvulas (alimentación o retorno a río).
f. Control de interferencias que causen resultados erróneos.

Además de este equipo se cuenta con un Kit de medición colorimétrica DPD, de cloro total y residual libre, marca HACH, modelo CN-66, Cat. No. 2231-01 (Figura A.7.57). Y herramientas básicas para las labores, como palas, palín, mazo, etc. Mientras que se carece de herramientas más especializadas como desatornilladores, cortadoras, tenazas, martillo, llaves francesas, por lo cual el fontanero utiliza sus herramientas personales. De modo que es necesario que la ASADA adquiera las herramientas faltantes.

Además se requiere contar también con capas o ropa impermeable para el personal, ya que se somete a las inclemencias del clima en medio de los terrenos montañosos, pudiendo afectar su salud.

La disponibilidad de un medio de transporte para el personal de la planta es imprescindible, para que les permita movilizarse adecuadamente y eficientemente en sus labores que implican: viajar a la toma de la quebrada y desarenadores, trasportar materiales, realizar lecturas de medidores, atender averías, fugas, instalación del servicio o corta del mismo a los usuarios, mantenimiento de tanques de almacenamiento, realizar mediciones de cloro residual en la red, entre otras.

A pesar que la ASADA cuenta con dos automóviles, no se destinan el uso de los operarios, por lo cual se utiliza el vehículo y motocicleta propiedad del fontanero para estos fines.

Esta situación supone un gasto personal no despreciable de gasolina, y el deterioro del vehículo debido a su uso en terrenos escabrosos no aptos para el mismo.

Actualmente el personal se debe trasladar a caminando, ya que la motocicleta fue robada y el vehículo se encuentra en mal estado. Esto hace muy complicado el trasporte de materiales y aumenta las horas requeridas para desplazarse a un lugar y también aumenta el tiempo de respuesta ante emergencias.

Es imperante que los automóviles se pongan a disposición del personal, con suministro de combustible a cargo de la ASADA, para realizar estas labores, ya que es responsabilidad de la asociación proveer los medios necesarios para que el personal realice su trabajo.

5.9.1. Instructivos de equipos

No se poseen los manuales del sistema cloración por electrólisis, mientras que los manuales del equipo de análisis de turbiedad y de las válvulas se encuentran en inglés y nunca ha sido consultado. Se mantienen guardados en la caseta de turbiedad y se encuentran en mal estado debido a la humedad de las instalaciones.

5.10. Mantenimiento y limpieza de equipo

5.10.1. Sistema de medición de turbiedad

De acuerdo al manual del equipo (Steady Stream 4 High-range Turbidimeter System Manual) las labores de mantenimiento del sistema de medición de turbiedad son las siguientes:

a. **Calibración del equipo:** se puede realizar de dos maneras, con el método húmedo utilizando una muestra con un valor de turbiedad certificado, y con el método seco, con un cubo de calibración con un valor de turbiedad certificado. De preferencia se debe utilizar el primer método.

   La calibración debe realizarse por parte de personal capacitado y con una frecuencia tal que garantice una exactitud aceptable. El periodo de calibración es definido por las características del agua muestreada y por la experiencia.

b. **Inspección del sistema:** verificar que todas las acciones del panel de control se estén llevando a cabo de manera normal.

c. **Limpieza del reservorio:** enjuagar las superficies del reservorio con agua limpia y limpie con una toalla húmeda (Figura 5.1). Para evitar o retardar el crecimiento microbiano, se puede colocar una tableta de cloro o bromo de difusión lenta.
d. **Limpieza del paso de la muestra:** se debe utilizar un cepillo alargado de cerdas suaves, para introducirlos en el canal de entrada y salida de muestra (Figura 5.1), con el fin de eliminar la suciedad. Los cepillos metálicos no pueden ser utilizados ya que provocan daños al sistema.
e. **Limpieza de la celda:** desatornillar cuidadosamente la pieza llamada baffle, de la celda de flujo (Figura 5.1), para limpiar internamente ésta última, utilizando una toalla limpia y húmeda. Enjuagar el bafle con abundante agua limpia y secarlo con una toalla suave. Volver a colocar las piezas. **Limpieza del cubo calibrador:** el cubo no debe manejarse con las manos, ya que la grasa interfiere con el valor certificado de calibración. Requiere limpiarse con alcohol isopropílico para eliminar impurezas y secarse con aire comprimido. El cubo que posee la ASADA se encuentra limpio y no ha sido necesario limpiarlo.

El personal de la planta realiza estas labores exceptuando la limpieza de los tubos de entrada y salida de muestra. El sistema se limpia solamente cuando se detecta un error en las lecturas. Se extrae manualmente el material que obstruye el fondo del reservorio, y se desprende la suciedad de las paredes con el movimiento de la mano sobre la superficie, utilizando agua. Mientras que la celda se limpia de la manera descrita anteriormente.

La calibración se realiza cada vez que se percibe un descontrol del sistema, evidenciándose en resultados erróneos de la turbiedad, y se utiliza el método seco, con cubo calibrador. El valor certificado del cubo es de 26,8 UNT. El fontanero del sistema potabilizador, cuentan con capacitación para realizar esta acción.

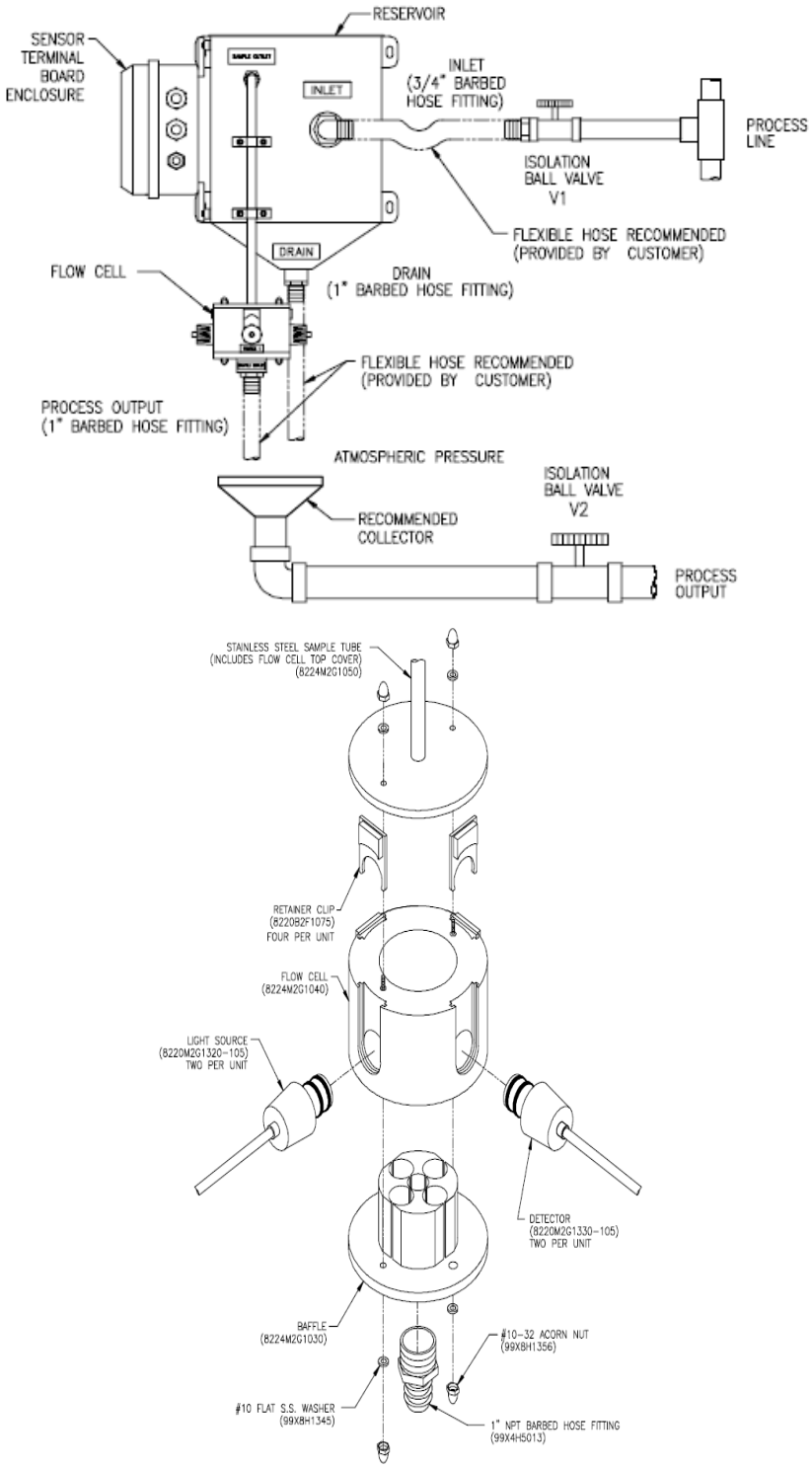


Figura 5.1. Esquema equipo automático de medición de turbiedad y detalle de los componentes del sensor de la celda de flujo. Fuente: Steady Stream 4 High-range Turbidimeter System Manual.

El cubo se mantiene confinado en la caja original y se almacena en la casetilla. Esta estructura es sumamente húmeda pudiendo afectar el cubo, ya que este requiere mantenerse en un lugar seco y fresco.

Para asegurar la exactitud de las mediciones del sistema se requiere: conservar el sistema calibrado, presión atmosférica en la muestra y líneas de entrada y salida, flujo constante en el reservorio, limpieza de la celda de flujo y del colector, y mantenimiento del sistema eléctrico.

5.11. Sistema Sanilec 6 Eltech

El mantenimiento del sistema Sanilec 6, descrito en el manual (OPS, 2000) consiste en:

a. **Inspección del sistema:** se debe verificar el correcto funcionamiento del equipo, las condiciones del sistema eléctrico y del panel de control, inspeccionando el consumo de electricidad, ya que si este se eleva por encima de lo normal, indicaría un posible problema en el equipo.
b. **Limpieza del electrodo:** consiste en agregar vinagre dentro de la celda y dejar reposar durante 30 minutos con el vinagre dentro de la misma, y repetir el proceso hasta que los electrodos se encuentren libres de depósitos. Finalmente se lava la celda internamente con abundante agua limpia.
c. **Limpieza de los tanques de disolución de cloro:** se debe lavar con regularidad las superficies internas y externas de los recipientes utilizados para preparar la disolución.

Los operarios llevan a cabo este mantenimiento del sistema, pero no se controla el consumo eléctrico, para determinar fallos en el equipo. El envejecimiento del ánodo produce un consumo excesivo de electricidad, por lo que debería monitorearse este aspecto, para definir el final de la vida útil del ánodo, y ser cambiado.

Una diferencia con respecto al mantenimiento descrito en el manual, estriba en que la celda permanece en vinagre mientras no sea utilizada para la electrólisis. Esta debería guardarse en el recipiente sin vinagre, ya que solo es útil para eliminar las incrustaciones.

El recipiente en el cual se coloca la celda mientras no se encuentra en uso, no posee tapa, permitiendo el acceso de insectos y suciedad, que pueden dañar los electrodos (Figura A.7.42). Por lo que debe colocarse una tapa en la estructura.

El panel de control se encuentra corroído, así también las llaves de paso y accesorios de hierro, debido a la acción de los gases producidos en la electrólisis.

5.12. Mantenimiento de la tomas y red de alimentación

En la época de invierno la quebrada arrastra muchos sólidos por lo que es común que las piedras y troncos llenen la pequeña presa de la toma y atasquen la entrada de la tubería, haciendo que el caudal disminuya, lo cual compromete el suministro de agua potable de la población que depende del acueducto. Por este motivo el personal se desplaza constantemente a la toma para despejar la entrada de la tubería, o solucionar algún problema en el resto de la tubería. Para esto se utiliza troncos delgados que se introducen por los orificios del soporte ayudando a evacuar los sólidos, y manualmente se extraen de la entrada de la tubería, o en las uniones que se encuentran a lo largo de ella.

También las averías en la tubería pueden causar la disminución del caudal, por lo que si se observa un problema de este tipo, se realiza la inspección sistemática de tuberías, para encontrar el desperfecto y solucionar el problema. Si se debe sustituir un tramo de la red o accesorio, se sigue una serie de pasos para garantizar el arreglo satisfactorio, como lo es escogencia del tipo accesorio o tubería adecuada, tipo de pegamento, tiempo de secado, inspección posterior. Si la reparación es subterránea se debe descubrir cuidadosamente la sección, para no romper la tubería y posteriormente cubrir con tierra de igual forma, para no dejar inestable el terreno o por el contrario muy presionado.

La toma de la naciente no requiere de un mantenimiento tan exigente como la quebrada, ya que la presencia de sólidos es prácticamente nula. Solamente se debe retirar la hojarasca de los alrededores.

Debido a que el trayecto de la red de alimentación utiliza los desniveles del terreno montañoso para impulsar el agua hasta la planta, el acceso a ese trayecto es muy complicado. Hay que caminar por terrenos escabrosos e inclinados llevando los materiales y herramientas necesarias para solucionar la avería. Siendo mucho más difícil en época de invierno, porque las lluvias desestabilizan el suelo y lo vuelven resbaladizo. En algunos lugares se complica aún más el desplazarse, debido a la presencia de despeñaderos, donde la única opción es sujetarse de las raíces de los árboles, poniendo en peligro la vida.

Por lo cual se recomienda que la ASADA acondicione los caminos dentro de los potreros, colocando troncos, cuerdas y apoyos que eviten resbalar tan fácilmente en los lugares más riesgosos.

También se presentan problemas en el camino de lastre que tiene acceso para vehículos por frecuentes derrumbes, suponiendo un peligro grave. Por lo cual se debe hacer una labor conjunta entre los vecinos y la ASADA, con el fin de mejorar los taludes y evitar el desprendimiento de materiales hacia el camino.

5.13. Limpieza de desarenadores

Los instrumentos utilizados para realizar la limpieza de los desarenadores son:

1. Botas de hule.
2. Palas tipo cafetalera.
3. Cepillo de cerdas metálicas (cepillo de raíz).
4. Varilla.
5. Balde.

Los desarenadores (Figura A.7.12) coadyuvan a eliminar los sólidos sedimentables provenientes de la quebrada El Yugo -la principal fuente del sistema-. Los desarenadores se limpian hasta dos o tres veces por semana en invierno y una vez cada quince días en verano.

Los desarenadores paralelos cuentan con un sistema de desagüe contra flujo. Se limpia una de las estructuras primeramente, dejando la otra en funcionamiento, y luego se procede de la misma forma con el otro desarenador. Se coloca y se cierra la compuerta de alimentación, para evitar el paso del agua a uno de los desarenadores, se limpian las rejillas internas (Figura A.7.72) que colectan los sólidos de mayor tamaño.

Luego se abre el sistema de desagüe, que consiste en una tubería de 3” en la pared del desarenador, el cual debería permitir la salida de la arena y del agua hacia el río cercano. Debido al tamaño y cantidad de sólidos sedimentados la salida del lavado se atasca completamente, impidiendo el paso del agua y de los sólidos. Debido a esto se retira el material con una pala directamente de la caja del desarenador (Figura A.7.73).

Cuando se ha sacado material suficiente, se que abre el paso del orificio internamente con una varilla (Figura A.7.74), mientras que otra persona retira externamente la arena que atasca la salida y las piedras grandes que tapan el desagüe. Este proceso de abrir el paso del desagüe se realiza hasta que el líquido se purga completamente, lo que puede durar de una a dos horas. Para acelerar el proceso se saca agua del desarenador utilizando un balde de cuatro galones.

Cuando el desarenador se desagua es posible retirar completamente la arena y los otros sólidos del fondo, para lo cual se utiliza una pala (Figura A.7.75). En este proceso se abre momentáneamente la compuerta constantemente, para que los restos más finos salgan por el sistema de desagüe. El material se coloca en un montículo a la par de las estructuras.

Luego se limpia la superficie interna con un cepillo de raíz (Figura A.7.76) para eliminar el musgo, realizando el proceso anterior de entrada de caudal. Posteriormente se limpian las rejillas secundarias que evitan el paso de sólidos no sedimentables (Figura A.7.17). Y luego se realiza el mismo procedimiento con la estructura complementaria.

Debido a que en invierno los desarenadores se llenan rápidamente con arena y piedras, se bloquea completamente la salida del lavado lo que complica la limpieza. Además el diseño del lavado no es eficiente, ya que los materiales sedimentados caen directamente sobre el desagüe impidiendo la salida del agua y haciendo que se invierta alrededor de dos horas en cada desarenador, sólo para solucionar este problema.

Por lo cual se recomienda rediseñar el lavado del desarenador. Y como acción momentánea implementar un segmento de tubería en la caja del desarenador, colocado verticalmente sobre el orificio de salida del lavado, que posea a su vez al menos tres segmentos desprendibles, con una tapa al final. Y de este modo se mantenga despejada la salida, cuando se realiza el lavado, se retira la tapa y se deja desaguar hasta el nivel de la misma, se aparta el material alrededor de ella, luego se retire un segmento de tubería y nuevamente se deje desaguar, y así sucesivamente permitiendo sacar completamente el material sedimentado con pala y completar el proceso de lavado.

5.14. Planta potabilizadora

5.14.1. Control del afluente

El control del afluente consiste en dos aspectos principales, revisión del caudal y cambios de turbiedad. El primero corresponde a un control cualitativo de la cantidad de caudal entrante. Debido a que el fontanero ha laborado en la planta por 18 años, conoce los flujos máximos y mínimos de caudal habitualidades, con respecto a las temporadas climáticas. De modo que le es posible asociar los cambios repentinos con algún problema en la red de alimentación y tomar las acciones correspondientes.

El segundo aspecto de control, se relaciona con la operación del sistema de medición de turbiedad automático, asociado a las válvulas también automáticas a la entrada de la planta. Los operarios deben definir el tipo de control del equipo, es decir, manual, automático o fuera, que fueron explicados en el capítulo 3 y 4, así como de mantener conectado el mismo a la corriente eléctrica.

El equipo de medición fue programado por el AyA para mantener abiertas las válvulas y permitir el paso de agua con valores de turbiedad menores a 100 UNT, y para cerrar las válvulas si se sobrepasa este valor, volviendo a abrir las válvulas cuando los niveles llegan a 30 UNT. Si el sistema se encuentra en el modo de control automático, por si mismo realizará estas acciones, pero si se encuentra en modo manual o no se cuenta con suministro eléctrico –y la batería de emergencia se agota-los operarios deben hacerlo.

La operación de este sistema de turbiedad, debe inspeccionarse constantemente y constatar el desvió del caudal, sea porque efectivamente el nivel de turbiedad se elevó y no a interferencias en el equipo. El aire en las tuberías de alimentación del turbidímetro, bajo flujo de entrada en el colector de muestra, así como sólidos grandes (hojas, piedras, semillas, etc.) que provocan resultados erróneos, tanto pueden aumentar o disminuir el valor real de la turbiedad en el agua de entrada en ese momento. De ser así se debe cambiar el equipo a estado manual y restablecer la alimentación, mientras se limpia el colector de muestra y/o se purga la tubería. Siendo unas de las razones para realizar los cambios en la toma de agua y en los desarenadores, sugeridos en el capítulo anterior.

En invierno la operación del sistema se vuelve realmente un calvario, pues si no hubiera problemas de arrastre y atascamiento en la toma de la quebrada, el sistema regularía el paso y se restablecería cuando las lluvias mermen, y se disminuya la turbiedad. Pero debido al arrastre de material el atascamiento de la toma es constante, y también en medio de la red de alimentación, por paso de sólidos. Lo que hace necesario que los operarios vigilen el nivel y turbiedad del caudal, ya que si el caudal baja deben ir a la montaña a abrir el paso en la toma, y en los tramos de tubería obstruidos, luego devolverse hasta la planta para continuar el control, hasta que la turbiedad llegue a los niveles normales. Siendo a veces necesario desplazarse varias veces en un día hasta la quebrada y aún de noche.

En verano -en condiciones climáticas normales- los niveles de turbiedad se mantienen bajos, por debajo de 10 UNT de acuerdo a lo registrado. Por esto el fontanero mantiene desconectado el turbidímetro y maneja manualmente el sistema. Sin embargo no debería ser de este modo por el carácter impredecible de los eventos naturales y antropogénicos que podrían elevar los niveles de turbiedad, sin que los operarios se percaten y alimentarse la planta con agua no apropiada pudiendo dañar la dinámica de los filtros y de la cloración.

5.14.2. Operación y mantenimiento de las válvulas y bombas del sistema

Las válvulas de la planta funcionan adecuadamente de acuerdo a la labor desempeñada por cada una. Las válvulas se limpian con frecuencia, las de tipo manual se aceitan cada vez que se hace necesario, por la dificultad de movimiento de las llaves. La operación de las válvulas automáticas se maneja desde el panel de control del sistema, ubicado en la casetilla de turbiedad.

Aunque se encuentran trabajando correctamente, el mantenimiento de las de tapas de hierro de las estructuras donde se encuentran las válvulas no es el adecuado (Figura A.7.29). Requieren ser reparadas ya que se encuentran agrietadas, o con desperfectos en su cierre, lo cual permite el paso de agua llovida, y ésta queda estancada dentro de las estructuras (Figura A.7.28). Esto no sólo puede provocar que se dañen las válvulas, sino también propiciar el crecimiento de microorganismos y vectores de enfermedades. También dificulta más su mantenimiento pues se requiere sacar el agua llovida almacenada.

Al reparar las tapas se evitará el paso de agua, se eliminarán los criaderos de insectos, se alargará la vida útil del sistema de válvulas y se simplificará el mantenimiento de estos elementos.

El personal no se encuentra capacitado para solucionar desperfectos en las válvulas automáticas, por lo que es aconsejable que la ASADA organice un taller de capacitación al respecto, para que de este modo no se dependa de personas externas cuando suceden imprevistos.

Las dos bombas que proporcionan la energía necesaria para impulsar el agua a los tanques de La Paz, se inspeccionan diariamente, para evitar averías por recalentamiento de las mismas. Este puede ser provocado por muchas razones, por entrada de aire, por bajo caudal, por desperfectos eléctricos, entre otros. Las averías en estos equipos son muy frecuentes, diariamente se purga el aire de las tuberías de salida, y cada 6 meses aproximadamente es necesario cambiar la tubería anexa a las bombas por el deterioro debido al calentamiento excesivo. Por esto es preciso realizar un estudio de las condiciones de operación y determinar si las bombas instaladas son las propicias para desempeñar la tarea.

5.14.3. Limpieza de biofilms en las superficies del sistema

Las superficies irregulares de concreto del sistema de entrada de caudal a la planta, de los filtros y de las canaletas propician el crecimiento y proliferación de bacterias del hierro, del azufre y reductoras de sulfatos, musgos y especies de flora asociadas a estas bacterias (Figuras A.7.77 a A.7.80). Éstas tapizan las paredes de la entrada de caudal, los vertederos, las compuertas, las superficies del filtro y de las canaletas. Además de resultar antihigiénico, estas bacterias contribuyen a la corrosión galvánica y a la suciedad debido a la formación de precipitados de azufre y hierro, además que pueden aumentar la turbidez e incidir en la calidad del agua potable. Es así como el vertedero y las compuertas se encuentran gravemente corroídas.

Por estas razones se inició una limpieza más rigurosa de las superficies mencionadas, retirando las capas o biofilms de microorganismos adheridos a éstas. La limpieza se realizó con cepillo y abundante agua, retirando el material desprendido en la entrada y los filtros (Figuras A.7.91 y A.7.92). Además en las canaletas se utilizó cloro en contra flujo desviando el agua residual a la canaleta de desagüe lateral. La utilización de una espátula coadyuvaría a eliminar las capas biológicas de los vertederos y compuertas.

El cloro no puede ser utilizado en la entrada y los filtros ya que es contraproducente al eliminar los microorganismos benéficos del sistema de filtración lenta.

Esta limpieza forma parte de la concienciación del personal de la planta en cuento a la importancia de procurar condiciones de sanidad en el sistema de potabilización, y en su operación y mantenimiento, con el fin de obtener agua de calidad.

Para disminuir la formación de biofilms y crecimiento de musgos sobre las superficies de la entrada de caudal a la planta, los filtros, y las canaletas, se recomienda emparejar las superficies y colocar azulejo con espacio de venilla mínimo. Así se eliminan las rugosidades que favorecen la adherencia de microorganismos y musgos a las superficies.

5.14.4. Estado de los vertederos, compuertas, tapas del tanque de contacto y llaves de paso

El vertedero, las compuertas de los filtros, la tapa del tanque de contacto (Figuras A.7.30, A.7.33 y A.7.47) se encuentran corroídas en toda su superficie. La corrosión compromete el estado de estas estructuras, lo que supone la pérdida de la función de las mismas, ya sea aislar de la contaminación en el caso de la tapa o regular el caudal en el caso de las otras estructuras, además de ser un problema para la calidad del agua. Se recomienda cambiar las estructuras y el material por acero inoxidable, con el fin de retardar el problema de la corrosión.

Luego de señalar estos aspectos de mejora, los operarios consideraron que era urgente cambiar la tapa de acceso al tanque de cloración, ya que se encontraba más gravemente corroída, que las otras estructuras y podía desprender materiales que pasarían directamente a la red de suministro, de modo que se realizó el cambio.

5.14.5. Filtros Lentos

Las tareas de operación y mantenimiento de los FLA con nivel del sobrenadante variable, se simplifican mucho con respecto a los FLA de tasa constante, ya que éstos últimos requieren del control y sincronización de las válvulas del flotador, con la velocidad filtrante, y válvulas compensadoras de la pérdida de carga, mientras que los de tasa variable no.

Las principales tareas que se deben llevar a cabo, durante el funcionamiento de los FLA son las siguientes:

a. Control del afluente.
b. Puesta en marcha
c. Control de las válvulas de salida.
d. Eliminación de material flotante.
e. Limpieza de la superficie del lecho filtrante
f. Lavado y almacenamiento de la arena.
g. Limpieza de las canaletas.
h. Reconstrucción del lecho filtrante.

5.14.5.1. Control del afluente

Ya que el afluente de la planta corresponde al caudal de entrada de los filtros, sin mediar ningún elemento u tratamiento, el control de este último corresponde al control del afluente de la planta, comentado anteriormente.

5.14.5.2. Puesta en marcha

El llenado del FLA se realiza lentamente y de manera ascendente, con el fin de eliminar el aire retenido en el lecho. La velocidad debe de estar entre 0,20m a 0,10m por hora, para no desacomodar los estratos, pero los FLA en la planta se llenan de modo tan rápido que se observan abultamientos en la capa de arena (Figura A.7.93), y el nivel del sobrenadante se deja al nivel de esta capa. Empero es necesario realizar esta acción hasta obtener un nivel adecuado de sobrenadante, para evitar que la presión del agua cruda forme agujeros sobre la arena, en la entrada del filtro.

5.14.5.3. Control de las válvulas de salida de filtración

El control de las válvulas en el efluente de los FLA se realiza principalmente para regular la velocidad de filtración. Al inicio de la carrera filtrante no se mantiene totalmente abierta la salida, ya que el filtro se encuentra poco colmatado y sin madurar, lo que provoca una tasa de filtración muy alta, por encima del promedio.

Aunque los operarios no llevan a cabo mediciones de velocidad de filtración, si lo hacen cuantitativamente, de modo si se encuentra muy alta, se cierra moderadamente el paso de la salida, para permitir que el agua en el filtro lleve a cabo un trayecto a través del lecho, con un tiempo tal que le permita percibir el proceso de desinfección principal.

5.14.5.4. Eliminación de material flotante

La remoción del material flotante es decisiva para disminuir la pronta colmatación del filtro, ya que con el paso del tiempo parte del material se humedece y precipita, mientras otra permanece formando una capa en el sobrenadante, pudiendo tapar por completo la superficie (Figura A.7.84). El material se descompone y aumenta el contenido microbiológico y orgánico del agua. En la planta no se realiza esta actividad, por lo que la capa biológica se mezcla con hojarasca e insectos y el sobrenadante presenta suciedad.

5.14.5.5. Limpieza de la superficie del lecho filtrante

La limpieza de los filtros lentos de arena en la planta Quebrada Yugo, se realiza cuando la carga hidráulica y la velocidad de filtración disminuyen considerablemente, lo cual se evidencia en un aumento crítico y súbito del nivel del sobrenadante. Esto se debe principalmente a la colmatación superficial de los espacios filtrantes, por parte de partículas sedimentadas provenientes del flujo de agua cruda y el crecimiento de microorganismos y algas, en la denominada capa biológica.

La colmatación es directamente proporcional a la turbiedad, carga orgánica y microbiológica del afluente de los filtros, lo que a su vez se encuentra relacionado con el clima. En época lluviosa el arrastre de sólidos aumenta drásticamente la turbiedad, cambiando la frecuencia de limpiado del sistema de filtración. El promedio de duración de la carrera filtrante es de 25 días en el periodo muestreado. Periodo que define la frecuencia de lavado de los FLA.

En invierno los filtros se limpian cada quince días, mientras que en verano cada cuarenta días, de acuerdo a lo indicado por el fontanero.

Los FLA funcionan intermitentemente, de modo que se asegure siempre la disponibilidad de un filtro para la continuidad del tratamiento, mientras se le presta mantenimiento al otro o en caso de emergencia de interrupción de la carrera, tal y como se comentó en el capítulo anterior. Así los FLA se limpian posteriormente a la finalización normal de la carrera de filtración, dejando en funcionamiento uno de ellos.

Los pasos recomendados para el retiro de la capa biológica son:

1. Retiro de material flotante.
2. Drenaje del sobrenadante.
3. Raspado de la superficie.
4. Retiro de la arena sucia.
5. Lavado de las paredes del FLA.

A continuación se describirá el proceso realizado por el personal de la planta, para luego realizar las recomendaciones correspondientes sobre el mismo.

El lavado de rutina consiste en vaciar el filtro y remover completamente la capa biológica superficial, utilizando los siguientes instrumentos:

a. Botas de hule.
b. Palas tipo cafetalera.
c. Cepillo de cerdas plásticas (cepillo de raíz).
d. Rastrillo
e. Manguera.

Para iniciar el lavado se cierra la compuerta de entrada de caudal al filtro que será limpiado, la cual se asegura con dos blocks de construcción y arena para evitar las fugas por defectos de la estructura.

Para vaciar el filtro (Figura A.7.85) se cierra la válvula del efluente y alimentación a la canaleta, para evitar la entrada de aire por la parte superior del filtro. Y para eliminar el sobrenadante se abren las válvulas de desagüe superficial (salida 3 en Figuras A.7.35 y A.7.36) a nivel de la arena, que llevan el agua sin filtrar al canal lateral de descarte, que conduce a una quebrada cercana.

Se deja secar la superficie de la arena, para proceder a remover la capa biológica, y algunas veces se deja secar el filtro por más de un día. Esta capa es de aproximadamente medio centímetro de grosor y se retira junto con dos centímetros de arena superficial, pudiendo extraer como máximo, cinco centímetros del estrato. Para esto se utiliza una pala tipo cafetalera, ancha con fondo y borde horizontal, que se introduce casi paralela a la capa de arena (Figura A.7.86).

La limpieza del filtro se inicia desde afuera del mismo, haciendo el retiro de un área cercana a la entrada del afluente, suficiente como para posarse sobre ella y poner así ingresar a la caja y proseguir con la limpieza. Esto se hace para no pisar la capa biológica y evitar revolverla con la arena, procurando esto durante todo el lapso de limpieza. Cuando el área limpia aumenta, entonces el segundo operario entra al sistema a coadyuvar en la tarea.

La arena retirada se coloca en el área de lavado, y se hace de este modo con cada palazo dado, aumentando la distancia recorrida y el tiempo que se carga la arena, conforme se aleja de la entrada del filtro. Mientras se debe tener el cuidado de no mezclar la capa biológica con la arena que queda descubierta, evitando caminar sobre la primera y limpiando con agua constantemente las palas, ya que en el fondo se queda adherida esta capa. Las palas se lavan en el sobrenadante del filtro adyacente, no sin antes eliminarles la mayor cantidad de material posible.

La arena retirada se deja secar en el área de lavado correspondiente, donde también se encuentra la arena limpia, lista para ser incorporada al filtro, de modo que se debe evitar no mezclarlas (Figura A.7.87). Se coloca cada montículo en los lados opuestos del área. Esa arena limpia corresponde a la arena retirada en la carrera anterior del filtro, que ha sido lavada y secada.

Luego de retirar el schmutzdecke se incorpora la arena limpia para reponer la cantidad sustraída. Primero se traslada la arena limpia del área de lavado hacia el filtro, utilizando la pala (Figura A.7.87) se dispersa uniformemente sobre la cama del filtro (Figura A.7.88). La arena se empareja sin presionarla, con un rastrillo de madera (Figura A.7.89) quedando el filtro disponible para llenarlo nuevamente y hacer su función.

Además se limpia la entrada del caudal y las paredes de los filtros, utilizando un cepillo de cerdas plásticas. Luego se extrae el material desprendido de las paredes y se coloca con la arena sucia.

Al realizar este proceso de limpieza se comprime la capa de arena, debido a que se debe caminar sobre ella, y aunado al proceso de filtración que ha llevado a cabo el filtro, se disminuyen más los espacios filtrantes.

Para solucionar esto se suelta la arena introduciendo y sacando la pala verticalmente, lo cual remueve la arena superficial del filtro, mediante el proceso conocido como “talonear”, realizado cada mes. Se empieza a soltar la arena desde el extremo posterior del filtro, hasta terminar en la entrada, de manera ordenada.

5.14.5.6. Lavado y almacenamiento de la arena

La arena retirada se deja secar en el área de lavado correspondiente, donde también se encuentra la arena limpia, lista para ser incorporada al filtro, de modo que se debe evitar no mezclarlas. Se coloca cada montículo en los lados opuestos del área. La arena limpia corresponde a la arena retirada en la carrera anterior del filtro, que ha sido lavada y secada.

La arena sucia se lava con agua cruda, proveniente de un ramal de la tubería de entrada. Se coloca una manguera ancha en la llave de agua con que cuenta cada área de lavado (se tiene sólo con una manguera de este tipo) y se abre el paso con flujo a presión dirigido hacia el montículo de arena. Esto permite que el lodo o capa biológica se desprenda del medio filtrante y se descarte por el desagüe, o que al flotar sea retirada manualmente. La arena se lava hasta que no se observe salida de lodo, y no hasta que el agua salga totalmente clara, debido a que los materiales finos de la arena le confieren coloración al agua. La arena se deja secar para luego ser utilizada nuevamente en el filtro hasta que éste sea lavado nuevamente.

5.14.5.7. Recomendaciones al proceso de limpieza de los FLA

Realizar el retiro de material flotante en el sobrenadante, diariamente durante la operación del filtro y antes de drenar el agua. El material flotante debe retirarse con una redecilla como las utilizadas para realizar la limpieza de piscinas, suficientemente larga -3 metros- para que tenga alcance en cualquier punto del filtro.

Prever la limpieza del filtro sin realizar desperdicios de agua. Debido a que el sobrenadante se desagua completamente antes del limpiar el filtro, cuando éste se encuentra colmatado, se desperdician hasta 43m^3 de agua. Si por el contrario se mantiene el proceso de filtración, sin caudal afluente, durante horas antes a la limpieza se aprovechará ese sobrenadante.

No dejar la capa de arena desnuda a merced del sol, debido a que este posee efectos perjudiciales para los microorganismos y activa la proliferación de algas. Ya que los FLA no son techados se debe tener especial cuidado con esto, ya que si se cambian drásticamente las condiciones del ecosistema del lecho, se provocará un desequilibrio, perdiendo gran cantidad de microorganismos beneficiosos.

Mientras que por otra parte se propicia el crecimiento excesivo de algas. Para evitar la incidencia directa de los rayos del sol, se debe realizar la limpieza al iniciar el turno de trabajo procurando retirar la capa biológica antes de las diez de la mañana.

Luego de esa hora se debe llenar el filtro de manera ascensional con agua filtrada, a un nivel mínimo de 0,30m, apara que el sol no incida directamente sobre el lecho y continuar la limpieza al siguiente día o en la tarde.

Cuando el filtro no esté en uso, luego de su limpieza, en el periodo en el cual se espera a que finalice la carrera de filtración de su igual, mantener un nivel mínimo de 0,30m de sobrenadante que proteja la capa de arena de los rayos directos del sol, y se mantengan las condiciones húmedas en las que se desarrollan los microorganismos.

Además se recomienda mantener la filtración con una velocidad mucho más baja, y con un afluente menor, que mantenga en equilibrio el sistema. Debido a que dejar el filtro sin funcionar, altera todo el ecosistema y tardará más en llegar a la maduración hasta volver al equilibrio. Sin embargo esto sólo puede ser posible si la capa de arena del filtro se encuentra sin colmatar, ya que de ser así como en el caso de los FLA de la planta, se pondría en peligro la continuidad del sistema. Ya que aún a una tasa de filtración tan baja, el filtro se colmatará rápidamente.

Llevar a cabo el taloneo cada vez que se limpia, para aumentar los espacios filtrantes en la superficie y alargar la carrera de filtración.

Instalar un sistema de baldes trasportados por un tecle o polea, para retirar la arena sucia, acelerando y facilitando su extracción, y evitando la tediosa tarea de desplazarse hasta la zona de lavado para depositar cada palazo de arena.

Utilizar mantas sintéticas sobre el lecho de arena, para que en su superficie crezca la capa biológica y sea fácilmente extraída y desechada. De acuerdo a Kumar (2004) estas mantas protegen el lecho de arena, brindan un mejor soporte, permiten realizar una limpieza más fácil y disminuyen el tiempo de maduración de los FLA . Para esto se debe realizar un estudio con el fin de determinar el tipo de manta adecuada y su funcionamiento *in situ*.

En la literatura se reportan diferentes métodos para realizar el lavado de la arena de los filtros, como el método de trillado, el método de raspado, correspondiente al practicado en la planta pero con la diferencia que no se coloca de nuevo la arena retirada, sino que se lava y se almacena. Al obtener una altura por debajo de 0,60m de arena, se retira la arena sucia, se coloca en el fondo la arena limpia y se cubre con el medio sucio retirado. Con el fin de no perder por completo la población microbiana, y tener un periodo menor de reacondicionamiento del FLA. Con el método desarrollado en la planta el medio se va colmatando progresivamente y perdiendo más velozmente la perdida de carga que resulta en carreras más cortas. Por este motivo se debe realizar un análisis de estos métodos, ver diferencias y determinar cuál es más conveniente.

Pulir con un material adecuado las paredes internas de la caja filtrante, a la altura dispuesta para el sobrenadante, de modo que se evite la adherencia de flora y se facilite la limpieza. También se puede utilizar azulejo. No pulir por al nivel en el cual se encuentra el lecho, debido a la ocasión de cortos circuitos. Mientras se realiza este cambio es mejor utilizar cepillos de acero que se desgastan menos, en vez de plástico, y para mayor remoción de la suciedad de las paredes de los filtros.

Las labores de limpieza del filtro suponen un riesgo para la salud de los operarios, si estos no cuentan con las medidas mínimas de higiene. En la capa biológica se retiene gran cantidad de microorganismos patógenos, además de larvas e insectos. Lavarse adecuadamente las manos con agua potable y jabón después de realizar esta labor, disminuye el riesgo de transmisión de enfermedades. Sin embargo irónicamente, la planta no cuenta con agua potable en el servicio sanitario ni en algún otro lugar. De modo que mientras se realiza un cambio en esa situación, se recomienda colocar dispensadores de alcohol en gel en el área de lavado de arena, para ser utilizado en la desinfección, no sin antes haber eliminado con agua la suciedad de las manos y debajo de uñas.

Los filtros limpios se dejan vacíos totalmente sin agua alrededor de tres días. Esto provoca el descenso de la población sinérgica de bacterias coadyuvantes en el proceso de filtración, incidiendo sobre el mismo, y disminuyendo la calidad del agua filtrada. Ya que supone un cambio drástico de las condiciones de estos microorganismos. A pesar de que el filtro no vaya a ser utilizado en esos tres días, se recomienda mantener un nivel mínimo de agua que cubra el estrato de arena con el fin de mantener las condiciones del hábitat de los microorganismos y no realizar cambios bruscos. También se está realizando una revisión de la frecuencia de lavado con el fin de determinar si es la adecuada.

5.14.5.8. Lavado de arena

El área de lavado de arena no cuenta con un sistema que evite que ésta se vaya por el desagüe (Figura A.7.82). Por lo que se recomienda colocar una escuadra de madera en la esquina de los desagües, de 15 a 20 cm de alto, que evite que la arena sea arrastrada hasta el desagüe, pero que a su vez permite al agua y los sobrenadantes rebalsar sobre la tabla. Así se disminuirá la cantidad de arena perdida en este proceso.

5.14.5.9. Canaletas

Parte de la limpieza de los filtros consiste en limpiar también las canaletas que reciben el agua filtrada, con cepillo de raíz y escoba (Figuras A.7.91 y A.7.92), ya que en las paredes crece una biopelícula abundante (Figura A.7.90). Para ésto se abre la válvula de desagüe de la canaleta y se procede a limpiar.

Esta limpieza aunque necesaria no se realiza con frecuencia, es común observar una capa biológica madura en las superficies. Es preocupante debido a que el agua que contiene las canaletas ya ha pasado por el tratamiento principal de filtración, por lo que las partículas y microorganismos desprendidos de los biofilms, pasan directoramente a la cloración, disminuyendo su eficiencia al aumentar la turbiedad, la carga orgánica y microbiológica del agua.

La Figura A.7.92 fue tomada días después de la charla de concienciación dirigida a los operarios, sobre la importancia del mantenimiento y lavado adecuados de las superficies del sistema de potabilización y que posteriormente por su propia iniciativa pusieron en práctica lo aprendido, y esta figura ilustra los resultados.

5.14.5.10. Reconstrucción del lecho filtrante

Desde que los FLA fueron construidos hace 16,5 años, no se ha retirado el material del lecho, para su limpieza, reacomodo y para el rearenado. Siendo un aspecto importante para garantizar la eficiencia del proceso de filtración, ya que con el paso del tiempo las capas se desacomodan y con los lavados, se pierde arena, reduciéndose progresivamente la altura de la capa de arena, impidiendo que se lleva a cabo un proceso de filtración uniforme y adecuado. Debiéndose realizar el retiro de la totalidad del lecho con una frecuencia de 3 a 5 años, de acuerdo a la disminución de la eficiencia y de las evaluaciones del lecho. Si al introducir una varilla en diferentes puntos del mismo se obtiene variaciones importantes en la profundidad de cada capa, indica que es necesario realizar esta acción.

Para la reconstrucción debe tenerse en cuenta que la eficiencia microbiológica de la arena nueva es muy diferente de la madura, porque esta se encuentra ya con una población microbiana importante. De modo que los últimos 30 cm de esta capa se deben extraer y guardarse a parte sin lavar para ser colocados posteriormente sobre la arena nueva o lavada, en un proceso de inoculación del lecho. El resto se lava hasta que no se observe salida de suciedad y se mezcla con la arena nueva, necesaria para completar un metro de espesor. Las demás capas se limpian con agua a presión, luego se separan y tamizan para obtener de nuevo el estrato original.

La puesta en marcha luego de la reconstrucción se desarrolla igual que al inicial la carrera, llenando la caja filtrante ascendentemente. La única diferencia consiste en esperar a que se eliminen los finos del efluente con control de turbiedad, dejar madurar el lecho al menos una semana y durante esto descartar el efluente.

El tiempo puede variar, lo recomendable que la eficiencia lo determine, de acuerdo a los resultados de análisis microbiológicos del afluente y efluente.

5.14.5.11. Mantenimiento del tanque de cloración

Debido a las malas condiciones de diseño del tanque de cloración, el lavado de este se dificulta. Entre estas deficiencias se encuentra el tener solamente una abertura para el acceso, inclinación del fondo del tanque contraria a la salida del lavado, entre otras, tratadas en el capitulo anterior.

Antes que se construyeran los filtros, el agua del río pasaba directamente a la cloración, quedando el fondo del tanque colmado de sólidos. Haciendo necesaria la limpieza con baldes, con los cuales se extraía el material, por la incapacidad del sistema de lavado de realizar esta acción. Lo cual volvía esta tarea muy extenuante.

Actualmente el tanque de cloración se lava cada año, dependiendo de la presencia de material depositado en él, que gracias a los FLA, la cantidad es muy poca y se lava ayudándose con escoba.

5.14.5.12. Sistema de Cloración

Las actividades de operación del sistema Sanilec 6, de acuerdo al manual (OPS, 2000) incluyen (Figura 5.2):

a. Preparación de la disolución de salmuera en los tanques de 250 L, agregando 9kg de sal común y mezclando hasta que la sal esté completamente disuelta.
b. Sumergir la celda completamente dentro del tanque.
c. Conectar el transformador a la fuente de corriente eléctrica.
d. Programar el tiempo de electrólisis con el reloj (timer) a doce horas. Inspeccionar que el voltaje y corriente se encuentren dentro de lo normal.
e. Desconectar el transformador de la fuente de energía eléctrica.
f. Retirar la celda y lavarla de acuerdo al procedimiento descrito en la sección 5.11.2.
g. Controlar las llaves de paso y la dosificación.
h. Verificar cloro residual libre a la salida del tanque.

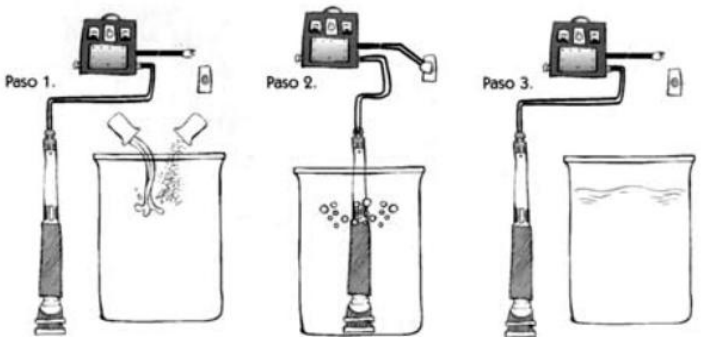


Figura 5.2. Pasos básicos de la producción de cloro *in situ*.
Fuente: (OPS, 2000).

5.14.5.13. Dosificación

La dosificación por goteo y la necesitad de controlar y regularla manualmente, hace que los operarios se encuentren expuestos a los riesgos asociados con el gas hidrógeno despedido de la disolución. Este gas es altamente corrosivo e irritante. Los operarios no utilizan y protección para evitar inhalar el gas y el contacto con la piel.

Con el nuevo equipo de dosificación por bombeo, este riesgo laboral se redujo significativamente, pues ya no es necesario el control manual.

5.14.5.14. Almacenamiento de la sal

Debido a que el cloruro de sodio es un compuesto altamente higroscópico, es menester almacenarla en un lugar seco. En la planta se mantiene en la casetilla de cloración, que es sumamente húmeda al igual que el resto de instalaciones. Este hecho aunado a que la sal se encuentra empacada dentro de un saco común, hace que al final se obtenga una masa húmeda que lixivia, afectando la calidad del producto.

Por esto se optó por adquirir sal en empaques de plástico que protegen mejor el compuesto, sin embargo el costo es mayor, porque se compraron paquetes pequeños, así que se debe realizar una cotización de diferentes marcas y presentaciones más grandes.

Este cambio trajo consigo la práctica inapropiada de quema de envolturas plásticas de los paquetes de sal, ya que provoca contaminación de la atmósfera.

5.14.5.15. Cambio de las llaves de paso en el sistema de cloración

Debido a los gases corrosivos del proceso de cloración por electrólisis, aunado a que este se realiza por goteo expuesto, sin aislar (Figura A.7.44), se han malogrado las estructuras de hierro de la casetilla de cloración, dentro de las cuales se encuentran las llaves de paso (Figura A.7.94) del sistema de alimentación de los estañones de clorado. Estas llaves se encontraban completamente desechas, por lo que conjuntamente con el cambio de la tapa del tanque, se instalaron nuevas llaves de plástico.

5.14.5.16. Nuevo sistema

Las desventajas del nuevo sistema Easy Clor 6, estriban en que la dosificación no es continua. Significando un riesgo de suministrar agua no potable a los usuarios, ya que hasta las 4 am se inicia la dosificación. Esto posee el inconveniente que los tanques de La Paz se alimenten con agua durante la noche y madrugada, la cual aún no ha sido clorada.

Además la empresa encargada de la instalación no entregó el manual de operación y mantenimiento, ni la ASADA lo solicitó. De modo que se han presentado problemas con la dosificación y su regulación, obteniendo valores muy bajos o nulos de cloro residual libre.
Sería de gran utilidad para los operarios determinar la curva de demanda de cloro, dependiente de cambios en el caudal, temperatura, ph y con cambios de fuente abastecedora, por presentar mayor carga microbiológica.

5.15. Mantenimiento y operación de la tubería de distribución de agua potable

La tubería de suministro potable varía de calibre dependiendo de la zona en la se encuentre y si es tubería primaria o secundaria. La mayoría del sistema de tuberías es de material de Policloruro de Vinilo (PVC), que constituye el material recomendado para estos fines, sin embargo en algunas zonas, la tubería domiciliar de conexión final del usuario, la cual no pertenece al acueducto, es de manguera, provocando constantes averías y fugas. Los vecinos que presentan este problema -dieciocho en total- se han resistido a cambiarla trayendo problemas en la tubería madre.

Asimismo las averías son provocadas por el tipo de conexiones inadecuadas que realizan los vecinos. Esta situación hace necesario el continuo traslado del fontanero para solucionar los problemas. El fontanero también realiza inspecciones para garantizar el buen estado del sistema de tuberías, así como para corregir anomalías entre las cuales se encuentran las conexiones ilícitas.

Una de las características de acueducto rural lo constituye el hecho que los usuarios conocen al personal de la ASADA y del comité, y poseen los números de teléfono personales del fontanero, por lo reportan constantemente las averías y otros problemas relacionados, permitiendo una atención inmediata de la situación.

El mantenimiento de la red de distribución implica además el trabajo conjunto del personal con instituciones o empresas, que realicen proyectos en las vías públicas. Ya que la mayor parte de la tubería es subterránea, los operarios de la planta deben estar presentes para impedir el quiebre de la misma y para realizar el reacomodo de la tubería en caso que la obra lo requiera.

5.15.1. Tanques de almacenamiento y quiebra gradientes en la ruta de distribución

Los seis tanques de almacenamiento se encuentran localizados a lo largo de la red de distribución, en La Lucha, San Cristóbal Sur, Calle Obando y tres en La Paz (Figuras A.7.48 a A.7.51). Son de dos materiales, de cemento -los más antiguos- y los ubicados en La Paz son de plástico. La operación de estas estructuras es supervisada por el personal, diariamente en el caso de los tanques de La Paz, constatando su nivel, esto porque son los únicos tanques que se llenan a presión proporcionada por dos bombas, ya que se encuentran por encima de la elevación del terreno del acueducto. Cuando su nivel llega al máximo, se eleva la presión del manómetro ubicado en la planta, y se envía una señal eléctrica, apagando la bomba, mientras al vaciarse los tanques el descenso de presión la activa.

El mantenimiento de los tanques plásticos consiste en vaciarlos y lavarlos internamente, retirando la suciedad de las paredes y del fondo. Estos tanques deben removerse para ser lavados, porque no cuentan con un sistema para este fin. Por lo cual es necesario acondicionar los tanques plásticos, creando un sistema de lavado en la parte inferior de los mismos. Estas labores de mantenimiento no se realizan de manera frecuente, en los cuatro años de instalación solamente se han lavado dos veces, pudiéndose encontrar capas de contaminación principalmente en el fondo. Por el peligro que esto significa para la salud del consumidor y para mantener la eficacia del tratamiento, se debe lavar frecuentemente estas estructuras, al menos cada semestre, utilizando una disolución de cloro y descartando el agua de lavado.

Los tanques de concreto poseen un sistema de lavado, y se limpian cada vez que se observe material depositado en el interior, y se hace de igual manera con los quiebra gradientes, descartando el agua del lavado.

5.16. Lectura de medidores de consumo domiciliar e inspección de estos equipos

La lectura del consumo de agua potable, por parte de los usuarios se realiza cada mes. Para esto se cuenta con una lista de los usuarios, número de localización y consumo de mes anterior, donde se anota el consumo registrado en los medidores. El recorrido se realiza a pie y se tarda dos días y medio para completarlo. Los instrumentos utilizados son:

1. Llaves de medidor.
2. Trapos absorbentes.
3. Varilla.

Para poder leer el medidor se debe abrir y retirar la tapa externa que lo protege, con las llaves adecuadas (Figura A.7.42), y luego abrir la tapa interna. Realizada la lectura se debe colocar la tapa nuevamente y cerrar con la llave.

Debido a que la mayoría de los usuarios no mantienen despejados los medidores, para llevar a cabo la lectura, se deben retirar también malezas, zacate (Figuras A.7.99 y A.7.100), tierra, barro y agua (Figuras A.7.96 y A.7.97) que impiden el acceso al medidor, y con un trapo limpiar la superficie.

Para esta labor es requisito tener mucho cuidado, debido a que la zona es rural abundan animales que se albergan en los medidores, como hormigas, arañas, y culebras, que vuelven peligrosa la tarea (Figuras A.7.101 y A.7.102). Además la mayoría de medidores fueron colocados en lugares inadecuados (Figura A.7.98), aún dentro de los hogares. Estas condiciones incrementan considerablemente el tiempo requerido para realizar las lecturas de los medidores y disminuye la vida útil de los equipos.

Juntamente con la lectura, se realiza la inspección de los medidores. Determinando la existencia de fugas, averías, o desperfectos en estos sistemas. Al leer el consumo registrado, se compara con el consumo anterior, disponible en la lista de anotaciones, si se encuentra muy por debajo o por encima de ese valor se realiza el retiro del medidor para ser examinado. Dependiendo del problema se arregla *in situ* o se colocar un medidor nuevo.

La lectura del consumo se aceleraría si se contara con trasporte para desplazarse a las zonas más alegadas.

5.17 Mantenimiento de taludes en la planta

Es necesario el mantenimiento adecuado de los taludes en la planta, por el riesgo que representa, ya que por la carencia del mismo, sucedió la caída de parte del talud de la parte posterior del sistema (Figura A.7.103). Se recomienda colocar una maya biodegradable junto con la siembra de especies con características de crecimiento radical preponderante, de modo que coadyuven a sujetar el terreno.

5.18 Concienciación de la comunidad y de la ASADA

La población del lugar carece de información sobre la importancia de potabilización del agua, sus costos, la administración del sistema, y de la situación actual del acueducto con los problemas de arrastre y turbiedad. Por lo cual se señala al personal como el culpable de la falta de suministro de agua, se tienen quejas del costo del servicio y se especula sobre el uso del dinero recaudado.

Aunado a esto se lleva a cabo un manejo inadecuado del agua, almacenándola en reservorios expuestos a contaminación y vectores de enfermedades. Por lo que es necesaria una labor de educación en la potabilización y manejo del agua, así como de la labor del acueducto, y los costos que esto implica, tomando en cuenta que el ser un acueducto rural le confiere características únicas, en cuanto a los aspectos económicos, sociales y culturales de la zona.

Se recomienda realizar campañas de información en las comunidades, actividades en las escuelas, en el colegio del lugar, visitas a los hogares que poseen reservorios inadecuados, entre otros. También se recomienda realizar un panfleto informativo mensual con información sobre los temas mencionados, el cual puede ser entregado a los usuarios en el lugar donde se realiza el pago del servicio.

La asociación comunal encargada del manejo de la planta también requiere de capacitación al respecto para mejorar la calidad del agua, el manejo de los costos por medio de un estudio tarifario, así como una evaluación de la misma ASADA que señale los potenciales de mejora.

Asimismo se debe concienciar a la ASADA sobre su responsabilidad como patrones del personal, cumplimiento de la legislación laboral, como brindar las condiciones dignas y adecuadas de trabajo, así como reconocer las labores realizadas, y motivar al personal. Es muy necesario también incorporar la importancia de trabajar en conjunto con el personal de la planta, y tomar decisiones en grupo para complementar el conocimiento que se requiere sobre el sistema de potabilización, para la toma de decisiones acertada.

5.19 Programas de protección del sistema de potabilización

Es importante contar con programas de protección del sistema, entre ellos, programa de seguridad del agua, programa de protección y reforestación de fuentes. Para los cuales es necesario contar con el apoyo de instituciones académicas, gubernamentales u ONG, que posean el conocimiento y la capacidad de trasmitirlo.

CAPÍTULO VI

RESULTADO Y DISCUSIÓN

CAPÍTULO VI
RESULTADO Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados y la discusión de los mismos, en cuatro apartados, descritos a continuación:

1. **Condiciones de operación de los FLA**, basada en la guía de CEPIS (1992) propuesta para la evaluación de los FLA, que incluye:
    a. Caudal de operación de la planta.
    b. Caudal de operación de los filtros.
    c. Velocidad de filtración.
    d. Pérdida de carga.
    e. Temperatura.
    f. Oxígeno Disuelto.
    g. Periodo de maduración de los FLA.
    h. Características del medio filtrante.
    i. Características del schmutzdecke o capa biológica.
    j. Carrera de filtración.
2. **Eficiencia de la desinfección**, basada en la CEPIS (2004) que incluye los factores que inciden sobre la eficiencia:
    a. Características del agua: temperatura, pH y turbiedad.
    b. Características del sistema de desinfección: tipo de sistema, determinación de la especie desinfectante predominante, tiempo de servicio de la disolución, la dosis de cloro aplicada y cloro residual libre.
3. **Eficiencia del tratamiento potabilizador** en cuanto a remoción de turbiedad y Calidad microbiológica (CT, CF, *Pseudomonas aeruginosa, y Enterococcus faecalis*), aspectos esenciales en un sistema de filtración lenta, basada en la guía de CEPIS (1992). Se determina la eficiencia de cada una de las operaciones unitarias de la planta en estos aspectos, como de manera global.
4. **Idoneidad del tratamiento de FLA con respecto al agua cruda actual**, con base en los resultados previos. Se resume la problemática estudiada y se finaliza con la propuesta FiME, para dar pie al diseño del FGDi en el siguiente capítulo.

Análisis Realizados

Las características de los análisis realizados se exponen en el siguiente cuadro.

Cuadro 6.1. Resumen de análisis realizados en la evaluación del acueducto Quebrada Yugo.

Análisis	Método	Puntos de muestreo	Instrumento o equipo
Turbiedad	Nefelométrico	Tubería de afluente de la planta	Turbidímetro automático marca GLI International, Modelo 8324
	Dispersión de luz	Canaletas de agua filtrada y salida del tanque de cloración	Turbidímetro de columna del Kit OXFAM DELAGUA
Cloro residual libre	DPD	Salida tanque de cloración	Kit marca HACH, modelo CN-66 Cat. No. 2231-01 cloro libre y total.
		Escuelas, EBAIS, Soda "Fiesta la Manzana", puntos más alejados de la red.	
Coliformes totales y fecales	NMP	Entrada al sistema Sobrenadante Canaletas de agua filtrada Salida del tanque de cloración	Materiales y equipo de laboratorio para NMP
Pseudomonas y Estreptococos	Filtración con membranas selectivas	Salida del tanque de cloración	Materiales y equipo de laboratorio para filtración con membranas
Temperatura	Dilatación del mercurio	Entrada al sistema Salida del tanque de cloración	Termómetro de mercurio Marca France
pH	Membrana selectiva de H^+	Entrada al sistema Sobrenadante Canaletas de agua filtrada Salida del tanque de cloración	Medidor de pH marca OAKTON modelo pHTester 30 waterproof

6.1 Condiciones de operación del proceso de FLA

6.1.2. Caudal de operación de la planta

El vertedero de la cámara de entrada, no reúne las condiciones requeridas para ser utilizado como elemento de medición de caudal. Siendo inútil, tratar de obtener su ecuación, por medio de pruebas como trazadores y otras. Por lo que el caudal de operación se obtuvo por medio del aforo. Así se registró un caudal máximo de 8 l/s, mínimo de 4 l/s, con un promedio de 6 l/s, durante el periodo de estudio. El caudal máximo corresponde a la época lluviosa mientras que el mínimo se relaciona con el verano.

El caudal se caracteriza por ser no permanente, variado y turbulento, de acuerdo a lo siguiente:

a. Flujo permanente y no permanente: esta clasificación obedece a la utilización del tiempo como variable. El flujo se considera permanente si los parámetros (tirante, velocidad, área, etc.) no cambian con respecto al tiempo, es decir, en una sección del canal en todos los tiempos los elementos del flujo permanecen constantes.

   Si los parámetros cambian con respecto al tiempo, el flujo se llama no permanente. (Villón, 1985)

b. Flujo uniforme y variado: se define tomando en cuenta el espacio como variable. El flujo es uniforme si los parámetros anteriormente mencionados, no cambian con respecto al espacio, es decir, en cualquier sección del canal los elementos del flujo permanecen constantes.

   Si los parámetros varían de una sección a otra, el flujo se llama no uniforme o variado. (Villón, 1985)

c. Flujo laminar y turbulento: Si el flujo existe de manera ordenada y de forma que puede idealizarse como capas infinitesimales de líquido desplazándose una sobre la otra, se dice que el flujo es laminar. Las fuerzas cortantes viscosas del material resisten el movimiento relativo de las capas adyacentes. Si no se cumple lo anterior, entonces se dice que el flujo es turbulento, las partículas se mueven de forma errática y se genera intercambios de energía entre las moléculas que conforman el fluido. (Mott, 1996).

6.1.3. Caudal de operación de los filtros

El caudal de operación de los filtros, coincide con el caudal de operación de la planta, ya que nunca se operan en paralelo, sino con carreras intermitentes, cuando termina la carrera de uno, empieza la del siguiente. De este modo al finalizar el funcionamiento del filtro, se procede a cerrar su correspondiente compuerta de acceso, y a abrir la de su igual, mientras que es limpiado y se alista para entrar en operación. Aunque con este modo de operación siempre se posee un FLA disponible en caso de eventualidades que trunquen el funcionamiento del otro, no debe realizarse así, ya que afecta gravemente las condiciones microbianas del FLA, por la carencia de oxígeno y nutrientes, lo cual se trata en detalle en el siguiente capítulo.

6.1.3. Velocidad de filtración

Se encontró que la velocidad de filtración toma valores de hasta los 1,20 m/h. Siendo mayor que el intervalo recomendado de 0,10 a 0,20 m/h cuando la filtración es el tratamiento primario, como en este caso, mientras que con tratamientos previos puede llegar a 0,30 y 0,40 m/h (CEPIS, 1992). Al aumentar la velocidad de filtración se puede incidir negativamente en el proceso de desinfección que lleva a cabo el FLA. Debido a que se disminuye el tiempo de acción de la población microbiana beneficiosa del schmutzdecke, sobre la población microbiana patógena del agua cruda.

La velocidad de filtración es un parámetro hidráulico que varia con el tiempo a partir de la puesta en marcha, con valores muy altos al inicio, y acercándose a cero al final de la carrera, por lo que debe ser regulado el caudal de salida.

6.1.4. Pérdida de carga

Se controló la pérdida de carga del filtro uno, durante una carrera de filtración, tomando diariamente la altura del sobrenadante. Los filtros se colmatan antes de llegar a la altura del vertedero de rebose, por las condiciones del lecho filtrante, de modo que la carga disponible real es de 1,12m.

Los resultados se graficaron con respecto al tiempo (Figura 6.1). Se observa la evolución de la pérdida de carga y la duración de la carrera del filtro, durante el lapso en el que se consume la carga hidráulica. Conforme avanza la carrera filtrante, incrementa la resistencia hidráulica, causante de la mayor parte de la pérdida de carga. La resistencia hidráulica se debe principalmente a la presión que provoca la capa biológica o schmutzdecke al paso del agua a través de ésta, por lo que la pérdida de carga aumenta rápidamente luego del periodo de maduración del filtro, hasta que este se colmata.

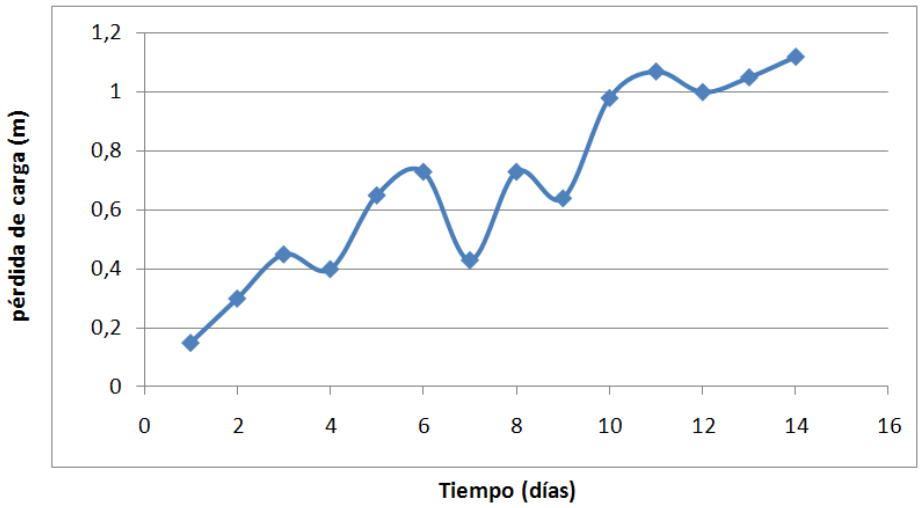


Figura 6.1. Comportamiento de la pérdida de carga a lo largo de la carrera filtrante.

6.1.5. Temperatura

La temperatura del agua incide directamente en el proceso de maduración del filtro. El ámbito de las lecturas realizadas durante el periodo en estudio, van desde los 9 °C hasta los 16°C. La temperatura presenta cambios importantes a través del día, siendo en promedio de 11°C al amanecer y aumentando de dos a tres grados durante el resto del día. Lo cual determina el tipo de población microbiana del schmutzdecke, la eficiencia de remoción de patógenos. También influye en la pérdida de carga de manera inversamente proporcional de acuerdo a la ley de Darcy, y del mismo modo sobre la concentración de oxígeno disuelto. Además es sumamente importante en el proceso de cloración, que será tratada más adelante.

6.1.6. Oxígeno Disuelto

Se realizó un muestreo del OD en los diferentes puntos de la planta de potabilización (Cuadro 6.2.). Los resultados obtenidos se encuentran todos dentro del intervalo recomendado sobre 6ppm (Galvis, 1999). El agua filtrada presenta un valor menor que el agua del sobrenadante en cada filtro, indicando que el proceso produce una disminución del OD, y que en el FLA maduro esta disminución es mayor, debido a mayor presencia de microorganismos.

El oxígeno disuelto es un parámetro limitante de la eficiencia del la FLA, ya que se requiere un medio aerobio que permita el desarrollo de la población microbiana sinérgica, responsable de la mayor parte del tratamiento. A parte de provocar sabor y olor desagradable, por la re-suspensión de metales pesados.

La concentración de oxígeno disuelto se relaciona con la temperatura de manera inversa, es decir a menor concentración, mayor temperatura, ya que la segunda juega un papel importante en la solubilidad de los gases.

Cuadro 6.2. Determinación del oxígeno disuelto en la planta potabilizadora Quebrada Yugo.

Punto de muestreo	OD (ppm)
Entrada de caudal a la planta	9,80
Sobrenadante Filtro 1(maduro)	7,70
Sobrenadante Filtro 2 (inmaduro)	8,71
Canaleta 1	6,49
Canaleta 2	7,94
Tanque cloración	8,76

6.1.7. Periodo de maduración

Se determinó la duración del periodo de maduración, mediante la cuantificación del tiempo, que toma para formarse visiblemente sobre la arena la capa biológica, desde que se pone en marcha el filtro. Esto en condiciones normales, con turbiedades menores a 100 UNT, es decir sin problemas de turbiedad o arrastre, que pudieran llevar al error, por la formación de sedimento en la superficie. El tiempo promedio de 6 días.

El crecimiento de microorganismos y flora sobre el estrato de arena, depende de las características químicas, físicas y microbiológicas del agua cruda. De acuerdo a éstas últimas, irán proliferando los elementos que conforman la capa biológica, hasta alcanzar un crecimiento visible en la superficie, momento en el que se alcanza la maduración del filtro y la calidad del efluente es la óptima del sistema. La conformación del schmutzdecke evidencia que los procesos de filtración y trasformación biológica han llegado a su apogeo, pudiendo entonces remover microorganismos de manera más eficiente (Adams, 2010).

La producción de CO_2 y el cambio en el pH, son dos aspectos que permiten determinar indirectamente la maduración del FLA, ya que la actividad microbiana, aumenta lo primero y disminuye lo segundo (CEPIS, 1992 y Unger, 2003). Se obtuvo el pH del caudal de entrada, del sobrenadante y del filtrado en el FLA maduro, al final de su carrera, para determinar si existe un cambio significativo en el pH, que permita utilizarlo como parámetro indicador de la maduración. Sin embargo los resultados (Cuadro 6.3) muestran que el descenso no es tan pronuncionado, siendo descartado para tal fin.

Cuadro 6.3. Determinación del pH en el proceso de filtración al finalizar la carrera de filtración.

Punto de muestreo	pH
Caudal de entrada a los FLA	6,86
Sobrenadante	7,89
Filtrado	6,93

Un parámetro más eficiente para determinar el momento en el cual el filtro se encuentra maduro, concierne a los coliformes fecales. Por lo cual recomienda desarrollar con apoyo de una institución académica, un estudio de eficiencia de los FLA en remoción de coliformes con respecto al tiempo. Para lo cual se debe cuantificar la presencia de estas bacterias tanto en afluente como efluente del FLA, diariamente desde el inicio de la carrera filtrante, durante varios ciclos, en invierno como verano, registrando las variables involucradas (temperatura, pH, turbiedad). Para luego determinar el porcentaje de retención, remoción y su correlación con las épocas climáticas y las variables en estudio.

6.1.8. Características del schmutzdecke o capa biológica

La capa biológica en los FLA del acueducto en estudio, posee una coloración verde oscura, con consistencia gelatinosa, típica de estos filtros. La cual crece mucho más rápido en invierno que en verano, por las lluvias que acarrean sedimentos. Cuando empieza a formarse el schmutzdecke, éste se ve como una capa delgada predominantemente café. En condiciones ambientales adecuadas, así como de operación y mantenimiento, la capa biológica se encuentra formada predominantemente por bacterias y protistas (Gyles, 2009). Cuando el agua cruda que alimenta los filtros, posee una cantidad adecuada de nutrientes, y la temperatura no es muy baja, la capa biológica se desarrolla sin problemas, y con mayor riqueza microbiana, que permite una mayor eficiencia en los procesos de remoción. Sin embargo la presencia desmedida de algún nutriente puede desequilibrar el crecimiento, evidenciándose en cambios de color del schmutzdecke. El exceso de hierro, manganeso y carbonatos provocan coloraciones rojiza, negra y blanca, respectivamente.

Normalmente la capa biológica es de color verduzco a café, ya que las algas filiformes (de forma o apariencia de hilos finos y alargados) le conceden este color. Las cuales remueven el dióxido de carbono y producen oxígeno, que es aprovechado por los microorganismos.Mientras que al final de la carrera se pueden observar abundantes hilos verduzcos y gelatinosos que crecen hacia arriba desde la superficie de la arena, debido a la excesiva proliferación de algas filiformes, llegando inclusive a presentarse episodios de blooms -crecimiento vertiginoso y descontrolado de algas- (Figura A.7.53).

Al terminar la carrera de filtración se pudieron determinar diferentes elementos constitutivos del schmutzdecke a nivel macroscópico, como hojas de árboles, algas e insectos principalmente mariposas y gusanos. Esto está estrechamente relacionado con la calidad del agua, como con el mantenimiento, debido a que no se retiran las impurezas ambientales, las cuales también disminuyen la eficiencia del proceso, por saturación del medio filtrante. Al eliminar el sobrenadante para la limpieza del filtro, se puede observar protuberancias redondeadas sobre el schmutzdecke, y que al inspeccionarlas revelan que su centro es uno de los insectos nombrados, que propicia el crecimiento de microorganismos a su alrededor.

La calidad de la capa biológica se puede mejorar retirando el material y organismos de la capa de agua, con una red tipo piscina, manteniendo el espejo de agua libre de contaminación flotante, lo que puede alargar además la carrera del filtro.

Se realizó una prueba de retención de CT y CF en la capa biológica del filtro, por el método de NMP para suelos. Para lo cual se extrajo parte de ésta al finalizar la carrera filtrante del FLA 1, y se analizó la arena limpia dispuesta para este filtro, con el fin de comparar los valores.

La muestra de capa biológica se montó en diluciones de $1x10^{-1}$ hasta $1x10^{-9}$, siendo ésta última el valor limite de dilución para coliformes. Las primeras ocho diluciones de la muestra, dieron positivas para CT (cuadro 6.4), para un resultado de $1,5x10^{7}$ NMP/g. En cuanto a CF los resultados son los mismos que para la arena limpia, 3,0 NMP/g.

Mientras que las diluciones para la arena limpia se hicieron hasta $1x10^{-5}$, de las cuales solamente dieron positivas las primeras dos (cuadro 4.5.), para un resultado de $4,3x10^{1}$ NMP/g para CT, dando negativas para CF, correspondiendo entonces a 3,0 NMP/g de CF -límite inferior de cuantificación-.

Cuadro 6.4. Determinación de CT y CF para la arena limpia y la capa biológica del FLA 1.

Dilución	Tubos positivos			
	Arena limpia		Capa biológica	
	CT	CF	CT	CF
$1x10^{-1}$	3	0	3	0
$1x10^{-2}$	1	0	3	0
$1x10^{-3}$	0	-	3	0
$1x10^{-4}$	0	-	3	0
$1x10^{-5}$	0	-	3	0
$1x10^{-6}$	-	-	3	0
$1x10^{-7}$	-	-	3	0
$1x10^{-8}$	-	-	2	0
$1x10^{-9}$	-	-	1	0
NMP/g	$4,3x10^{1}$	3,0	$1,5x10^{7}$	<3,0

De acuerdo a estos resultados el schmutzdecke, lleva a cabo una retención de 6 log, para CT, mientras que no se encontró presencia de CF. Esta situación es característica de capas biológicas inmaduras, ya que la retención de CF se registra hasta que la población microbiana de la superficie de la arena se ha desarrollado completamente. Por lo cual el resultado no encuentra concordancia con la teoría, siendo requerido un estudio a fondo para controlar continuamente la composición, retención y variables implicadas en el proceso de maduración y determinar la eficiencia de retención con los grupos coliformes.

6.1.9. Carrera de filtración

Los FLA evaluados, presentaron carreras de 25 días en promedio, debido a los efectos del aumento de turbiedad en épocas de lluvias.

La duración de la carrera filtrante depende de dos parámetros, la calidad del agua cruda, especialmente en cuanto a turbiedad, y de la pérdida progresiva de carga -parámetros que se ligan directamente con la formación de la capa biológica-. Y sirve como un índice de eficiencia operacional del sistema, siendo lo óptimo, carreras de por lo menos un mes, pudiéndose tener hasta tres meses, dependiendo de los parámetros mencionados. Carreras de duración menor, no permiten la maduración certera del filtro, socavando la calidad del efluente, además que interfieren con el desarrollo normal de administración de la planta, por requerir limpieza tan frecuentemente.

La duración de las carreras también se puede ver afectada por las malas prácticas de mantenimiento, evaluadas en el capítulo 5.

6.1.10. Características del medio filtrante

La calidad del lecho filtrante determinará la calidad del tratamiento principal del agua, y esto es de suma importancia, ya que el producto está destinado para ingesta humana. De modo que es uno de los aspectos más significativos en la evaluación.

6.1.10.1.Espesor y composición del lecho

Las capas en un sistema de filtración lenta, están dispuestas de manera que la granulometría sea ascendente con la dirección del flujo, con el fin de obtener un sistema de presión también ascendente.

Lo anterior obliga al agua sobrenadante a pasar al fondo del filtro, por ley de mecánica de fluidos, que indica que éstos se desplazaran de mayor a menor presión, consiguiendo de este modo el tratamiento purificador del agua. Este orden de capas que perciben un flujo hacia abajo, impide el arrastre de las capas superiores del filtro, siendo muy importante la existencia de un soporte adecuado, que permita el paso del agua filtrada.

El lecho de los filtros lentos localizados en la planta Quebrada Yugo, poseen cinco capas de materiales, en este orden: piedra soporte en la base, piedra “papilla”, piedra “cuarta”, “arrocillo” y arena en la superficie. Esta última compone el medio filtrante, mientras que las otras cuatro forman el lecho de soporte.

Se desconoce el espesor de los cuatro estratos de soporte, ya que en la construcción de los FLA no se determinó una altura determinada, sino que se adquirió un metro cúbico de cada uno de los primeros cuatro materiales y se colocaron de modo que tuvieran un espesor uniforme a lo largo del filtro. Esto es conforma una grave falla en cuanto a diseño del lecho, porque se debe partir de una altura para luego obtener la cantidad de material requerido para un filtro dado, y no al revés. Esas alturas están dadas por parámetros obtenidos en estudios, que indican los espesores adecuados de cada material para llevar a cabo un proceso satisfactorio de filtración y drenaje del agua.

Ya que no se posee el dato del grosor de cada capa, se idealiza el acomodo de los elementos de cada material, de acuerdo al diámetro promedio de cada uno de ellos. El volumen inicial de cada material -un metro cúbico- , debe ser igual a la multiplicación del ancho y el largo del filtro, por la altura de cada estrato -la incógnita-.

Resolviendo lo anterior se obtiene que la altura corresponde es de aproximadamente 2cm, en el caso que el diámetro fuera tan pequeño que permitiera un acomodo con espacios vacios muy pequeños. Esto se puede suponer con los materiales de diámetro inferior a la altura obtenida, es decir solamente con la piedra tipo "arrocillo" con diámetros entre 3-6 mm. No así con la piedra "cuarta", "papilla", y "soporte" ya que su diámetro es de 2,5cm 3,8 cm y 6,35cm respectivamente, de modo que se supone este diámetro como el grosor de cada capa sin tomar en cuenta las tuberías de drenaje. En los FLA se recomienda espesores de la capa de arena entre 0,90 y 1,20 m. Un lecho con profundidad menor de 0,60m disminuye la eficiencia de los procesos físicos, químicos y biológicos que se llevan a cabo en el filtro.

Los valores cercanos al límite superior del ámbito mencionado, previenen la urgencia de rearenado y disminuyen la frecuencia del mismo, pero por razones económicas y estructurales, no es recomendable sobrepasar los 1,40m (CEPIS, 1992).

El lecho ha sido ordenado una sola vez, en el momento de la construcción de los FLA, hace 16,5 años aproximadamente. En ese momento se colocó la capa de cada material, con un grosor uniforme, pese a ello el transcurso de los años de operación ha provocado que estas capas se encuentren desacomodadas.

El espesor del lecho fue determinado por medio de una varilla, que fue introducida en tres diferentes lugares del FLA 1 (Cuadro 6.5). Este filtro presenta un espesor variante del lecho, que va desde 1,35 m a 1,18 m en los puntos de inspección. Consecuentemente presenta un desnivel de 17 cm, con el fin de facilitar el desagüe de los mismos -de acuerdo al fontanero-, no obstante la pendiente tiene repercusiones sobre la presión del sobrenadante y como se comentó el desnivel debería estar definido por la estructura en sí y no por el lecho (sección 4.6.3.9).

Es preciso realizar cuanto antes la reconstrucción del lecho del filtro. Los diferentes materiales deben estar dispuestos en capas de modo ordenado y con grosor constante, ya que de lo contrario el proceso de filtración pierde eficiencia, por no desarrollarse uniformemente a través del lecho.

El acomodo de las capas es diferente en distintos puntos, provocando que la presión y el momento filtrante sean distintos también. Este último hace referencia al factor espacio-tiempo, el cual se opone al pasaje de la partícula a través del filtro. En estas condiciones el proceso no se está desarrollando de la misma forma en todos los puntos. Y provoca que el flujo tienda a filtrarse por donde existe menos presión, es decir las áreas donde las capas son más delgadas y se tiene menos arena.

Los niveles de la capa de arena no se desvían de los parámetros, donde 1,20 m es lo máximo y 0,60 m el mínimo recomendado (Cuadro 6.5). El resultado de 0,78m se encuentra fuera del intervalo óptimo, pero no sobrepasa el nivel mínimo recomendado.

En cuanto al lecho de soporte, incluyendo el drenaje, las alturas sugeridas son de 0,10 a 0,30 m (CEPIS, 2005). Solo el valor correspondiente a 0,36 sale de este ámbito sugerido, pero tampoco se aleja en demasía (Cuadro 6.5).

Cuadro 6.5. Altura del lecho y del estrato de arena del FLA 1, en el acueducto Quebrada Yugo.

Punto de inspección en el lecho	Altura de la capa de arena (m)	Altura del lecho de soporte (m)	Altura total del lecho (m)
Entrada caudal	0,99	0,36	1,35
Mitad del filtro	0,78	0,49	1,27
Salida caudal de limpieza	0,98	0,20	1,18

6.1.10.2. Grado de colmatación superficial de la arena

La formación de la capa biológica sobre la superficie de arena, es la responsable de la mayor parte del tratamiento en los filtros, al atrapar y trasformar las impurezas del agua, pero al mismo tiempo, causa la mayor pérdida de carga por colmatación. Esta última es mayor en la parte superior del lecho y va disminuyendo a través del mismo. Se considera que la capa se encuentra colmatada, si posee un contenido mayor o igual del 5% de sedimento (CEPIS, 1992). Esta será la capa que debe retirarse para la limpieza del filtro.

Se extrajeron muestras de arena a diferentes profundidades a partir de la superficie, con el fin de determinar el avance y porcentaje de colmatación a través de la capa. Se colocaron individualmente en recipientes de vidrio trasparentes y planos, agregándoles agua limpia, agitando durante un minuto y dejando reposar cinco minutos. Posteriormente se midió la altura del sedimento y la altura de la arena. El porcentaje de colmatación se obtuvo dividiendo la primera entre la segunda, y multiplicándola por 100.

Los resultados de la evaluación del contenido de sedimento se muestran en el Cuadro 6.6. Los porcentajes de colmatación varían de 50% al 100%, pero no siguen una tendencia, ya que se espera que varíen de manera gradual a través del la profundidad del lecho. En la superficie se obtuvo un 50% de sedimento, un valor menor que a otras profundidades, lo cual puede deberse a que ésta es la capa que se extrae constantemente, para realizar la limpieza del filtro.

Una observación importante de la prueba, es que la capa superior de 2cm de profundidad, poseía características muy diferentes al resto. El sedimento observado presentaba partículas gruesas correspondientes a la capa biológica, por lo cual se asentó rápidamente, mientras que en el resto de muestras, el sedimento fue de apariencia coloidal y por lo tanto se obtuvo una velocidad de sedimentación más baja. Esto brinda una idea sobre la diferencia del material retenido en la superficie del filtro, con respecto al interior del lecho de arena. En la superficie se presenta la formación del schmutzdecke y la retención de partículas más gruesas.

Cuadro 6.6. Contenido de sedimento en el filtro lento uno, del acueducto Quebrada Yugo.

Profundidad de muestreo (cm)	Altura de arena	Altura de sedimento	Porcentaje de sedimento (%)
2	2	1	50
5	1,7	1,2	70,6
8	1,3	1,3	100
10	1	0,8	80
13	1,4	0,7	50
16	0,75	0,75	100
20	2	1	50
25	2	1	50
30	2,9	1	34,5
70	1,1	0,3	31,8

Se obtuvo un 100% de colmatación a 8cm y 16 cm de profundidad, y a partir de esta última profundidad, los resultados sí siguen la tendencia de disminución esperada. Esto evidencia que el proceso de filtración no es uniforme en la superficie de la capa de arena, de ser así la colmatación disminuiría con la profundidad, como si lo hace alrededor de los 20 cm de profundidad.

Pese a esto, aún a los 70cm la arena se encuentra colmatada, con un contenido de sedimento del 32%, poniendo en evidencia la carencia de espacios filtrantes. Lo cual se evidencia en las cortas carreras de filtración de 25 días en promedio, la rápida pérdida de carga y el porcentaje de remoción de coliformes fecales y otras bacterias de interés en salud pública, como los estreeptococos y pseudomanas. Así como la necesidad de realizar una limpieza profunda del lecho, lo cual fue tratado en el capítulo 5. La prueba deberá ser repetida luego de realizar esta limpieza, con el fin de determinar la altura de la capa que se debe retirar al limpiar el filtro.

La evaluación del contenido de sedimento, es útil para determinar la disponibilidad de espacios filtrantes que posee la arena, y realizar estudios de correlación con la eficiencia, la duración de las carreras y las pérdidas de carga.

6.2 Eficiencia de la desinfección

6.2.1. Determinación de los factores que inciden sobre la eficiencia de la desinfección

Los factores que interfieren en la eficiencia de la cloración, están relacionados tanto con las características del agua, como con las características del sistema de cloración.

6.2.1.2 Características del agua

Las principales características de agua, que influyen en el proceso de desinfección son la temperatura, el pH, turbiedad, el color, tipo de microorganismos, la materia orgánica, el nitrógeno amoniacal, Fe, Mn, SO_2, H_2S, entre otros. La presencia y concentración de estos últimos compuestos, se relacionan con suelos arcillosos (Fe), con fertilizantes en campos agrícolas (NO_x), e interfieren en la eficiencia de la desinfección, debido a que consumen cloro en el proceso de oxidación. El contenido de materia orgánica es otro aspecto de cuidado, ya que puede dar pie a la formación de THM. Solamente se analizarán las primeras cuatro características del agua mencionadas anteriormente.

a. Temperatura

El ámbito de temperatura del agua de la planta, obtenido durante el periodo en estudio, va desde los 9ºC hasta los 16ºC, y el promedio es de 12,5 ºC propiciando una mayor concentración del HClO. Siendo una ventaja sobre el proceso de remoción de microorganismos, debido a que esta es la especie que los elimina más eficientemente. Por su tamaño y neutralidad puede penetrar y oxidar las proteínas en las membranas celulares.

La temperatura interfiere en tres etapas distintas de desinfección, y en cada una juega un papel diferente. Estas etapas son: aplicación (la solubilidad del desinfectante), demanda de cloro (velocidad de las reacciones), y composición del cloro libre (relacionado con el equilibrio de disociación del ácido hipocloroso).

En cuanto a la solubilidad, la temperatura es importante, principalmente cuando la desinfección se realiza con agentes gaseosos, debido a que la solubilidad de éstos es inversamente proporcional a la temperatura, dificultando el proceso desde temperaturas menores a 15ºC. Debido a que las fuerzas moleculares entre soluto-disolvente, deben superar las fuerzas de atracción soluto-soluto (cloro) y disolvente-disolvente (agua), para lograr solubilizar el cloro.

Se requiere que la energía cinética molecular se encuentre entre un ámbito, que permita romper estas fuerzas, principalmente las del agua, ya que son de mayor magnitud por ser un líquido -con respecto a las de un gas-.

Pero la energía debe ser tal que a la vez se puedan mantener las fuerzas moleculares entre el compuesto y la sustancia. Con altas temperaturas la velocidad cinética promedio molecular del agua y el gas, aumentan, venciendo las fuerzas entre soluto y disolvente, escapando así el gas cloro. En cambio cuando se dosifica una disolución de cloro, como en el caso de la planta evaluada, la mezcla se produce más fácilmente.

Por otro lado, la temperatura interfiere en el avance de las reacciones de formación del ácido hipocloroso, y de éste con otros compuestos presentes en el agua, las cuales determinan la demanda de cloro. La velocidad de reacción, depende de la temperatura, porque se requiere una entropía molecular tal que, se aumente el número de colisiones efectivas entre compuestos, y sea suficiente como para alcanzar la energía de activación, para entrar al estado de transición. Aún a temperaturas cercanas a 10ºC, como en el caso de la planta Quebrada Yugo, se llevan a cabo las reacciones, pero a una velocidad menor, es decir el tiempo de contacto debe ser mayor con respecto a otras temperaturas. Para muchas reacciones la rapidez se duplica cada 10ºC.

Con respecto a la composición del cloro libre, la temperatura repercute sobre la concentración de la especie desinfectante principal, el HClO, debido a su injerencia en el equilibrio de disociación de este compuesto. La relación entre temperatura y concentración de HClO, es inversamente proporcional, es decir a menor temperatura, mayor concentración de ácido hipocloroso, y viceversa, esto a un mismo pH comprendido entre 6 y 9. Siendo ventajoso paras el tratamiento de las aguas que abastecen el acueducto.

Por ejemplo a pH 7, el porcentaje de HClO a 10ºC es de 83%, mientras que a 20ºC, es menor en 8 puntos porcentuales (Cuadro 6.7). Con valores de 4, 5, 10 y 11, los valores no cambian con la temperatura, con los primeros es del 100%, y con los últimos de 1%. Esto se debe a la dependencia del equilibrio de disociación con respecto al pH, comentada en el siguiente punto.

Cuadro 6.7. Relación del pH y la temperatura en la concentración de HClO (%).

Temperatura (ºC)	pH							
	4	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**
10	100	100	98	83	32	3	1	1
20	100	100	96	75	23	4	1	1

Fuente: CEPIS, 2004.

Así el tiempo de contacto requerido dependerá de la temperatura y debe cubrir el tiempo requerido para llevarse a cabo las reacciones que generan demanda de cloro, como las reacciones de desinfección.

b. pH

En el caso de la planta en estudio, el pH promedio del agua filtrada, que llega al sistema de cloración, se encuentra en 6,98 siendo condiciones favorables, pudiéndose asegurar que la especie predominante en el tanque de cloración corresponde a HClO. Este fue determinado con un medidor de pH marca OAKTON (Figura A.7.59).

El pH también tiene un papel preponderante en el equilibrio del ácido hipocloroso. A valores bajos, entre 4 y 5, el equilibrio de disociación del HClO, se encuentra totalmente desplazado hacia la izquierda, es decir el 100% del cloro residual libre está en forma de HClO. Mientras que el proceso de desinfección se ve desfavorecido con pH altos, a partir de pH 7 la concentración de la principal especie biocida, va decreciendo hasta llegar al 1% con pH de 10 y 11 (Figura A.2.2).

c. Turbiedad

En el acueducto de Quebrada Yugo la turbiedad del agua filtrada, se mantuvo por debajo de 5UNT, que es el límite de cuantificación del aparato utilizado. Solamente en una ocasión se sobrepasó ese valor, llegando a 20 UTN, sin embargo el agua fue desechada antes que pasara a la cloración.

La turbiedad es una de las características del agua que debe controlarse antes de la cloración, para que ésta sea efectiva. Las partículas suspendidas pueden albergar microorganismos y evitar que sean alcanzados por el desinfectante, sirviéndoles de escudo. Además la materia en suspensión puede provocar la formación de subproductos de la cloración, altamente dañinos para el ser humano.

Por estos motivos la turbiedad antes de la cloración debe encontrarse igual o menor a 1UNT, para alcanzar la eficiencia máxima del proceso de desinfección, siendo este el valor recomendado por la OMS y por el Reglamento para la Calidad del Agua Potable (Decreto Nº 32327-S). Este valor debe ser asegurado por los procesos anteriores a la desinfección, ya que de ellos depende la calidad del agua a clorar, como es el caso del acueducto de La Sierra. Así la eficiencia de los tratamientos previos, determinará la eficiencia de esta etapa final de potabilización.

6.2.1.3. Características del sistema de desinfección

a. Sistema de generación de cloro in situ

Los sistemas de generación de cloro in situ, han tomado mayor auge en las dos últimas décadas (Reid, R. n.d.), debido a que constituye un método simple, económico, comparado con la cloración con gas cloro (Campistrous, et.al 2005). Esta metodología elimina los riesgos de fugas del gas, así como el riesgo laboral para los operarios. Además brinda independencia de los proveedores, ya que el único insumo que se debe adquirir es el cloruro de sodio -sal común-.

b. Especie desinfectante

La especie desinfectante presente en mayor proporción en la mezcla producida *in situ* es HClO, por las condiciones de pH y temperatura esta es la especie con mayor capacidad biocida por su tamaño y su neutralidad química, que le permite penetrar las membranas celulares y causar daños a nivel estructural (Masís, J. T. n.d.).

c. Tiempo de servicio de la disolución

El periodo que se requiere suministro eléctrico para ser trasformado en una reacción química para convertir los 9 kg de cloruro de sodio en HClO y HCL^-, es de 12 h por lo que el procedimiento de realizar la disolución se realiza previendo este tiempo requerido. Y debido a la experiencia de los operadores la mezcla no permanece mucho tiempo sin ser dosificada. Se calcula el momento de iniciar su producción con base en el gasto de su par. De modo que lo determinante es el tiempo de servicio de la mezcla de cloro, cuyo promedio es de 2,5 d.

Es sumamente relevante determinar el tiempo en que la dosis permanece en el tanque de electrólisis. El cual incluye desde que termina el tiempo de formación de cloro hasta que la última gota es dosificada al tanque de contacto. Debido a que la exposición a las condiciones ambientales, la disolución cambia su composición, siendo crítico el tiempo de vida medio de la especie desinfectante HClO.

La disolución debe mantenerse protegida de la luz del sol, en un contenedor que impida la absorción de la misma. Preferiblemente recipientes plásticos (Rojas y Guevara, 2000).

d. La dosis de cloro aplicada

Para esto se determinó la concentración y flujo del desinfectante dosificado, la cual permanece constante durante el día, no se adecua a las variaciones de caudal entrante al tanque de cloración. Solamente por la noche se reduce.

El sistema de aplicación es por goteo, graduado por una llave de paso. Se mantiene un flujo de 350ml/min, controlado por medio de cronómetro y un recipiente aforado.

La cloración se reduce a 200ml/min durante la noche ya que el consumo del líquido es menor y la masa de agua permanece más tiempo en contacto con el cloro.

La mezcla de 250L posee 1,5kg de cloro disponible, es decir la disolución es de 6000 ppm de cloro. Con una alimentación de 64m^3/h se obtiene una disolución de 4,6 ppm de cloro, por lo que se consumen ppm en reacciones químicas y microbiológicas, dejando un 0,5 ppm de cloro residual. Además se obtuvo el cloro residual libre en diferentes puntos del sistema con el Kit HACH (Figura A.7.57). Los puntos de muestreo fueron elegidos por relevancia para la determinación (Cuadro 6.8), descrita a continuación:

i. **Salida de la cloración:** definir si del tiempo de contacto en el tanque de cloración, genera cloro residual libre de acuerdo al Reglamento para la Calidad del Agua Potable (Decreto Nº 32327-S).

ii. **Primera conexión:** se debe asegurar que el primer usuario obtenga agua que ha contado con el tiempo requerido para la acción desinfectante, evidenciándose en la concentración de cloro residual. Esto es aún más crítico pues este punto corresponde a un establecimiento de venta de comidas, pudiendo tener un impacto mayor en caso de una deficiente desinfección.

iii. **Escuelas y EBAIS:** estos lugares representan la población más susceptible a enfermedades, por lo que son puntos críticos e indispensables para tomar las muestras y establecer un control.

iv. **Puntos más alejados:** la tubería de distribución principal, posee varios ramales, que abastecen los distintos pueblos, existiendo así varios puntos que representan los lugares más alejados, en el fin de cada ramal. La importancia de obtener cloro residual libre en estos puntos, estriba en determinar tanto las condiciones de los sistemas de distribución, como asegurar que el cloro dosificado produce una concentración de cloro libre adecuada para los últimos usuarios.

Todos los puntos muestreados presentaron una concentración de 0,5 ppm (Cuadro 6.8), siendo la adecuada para protección del líquido en eventuales sucesos que puedan socavar la integridad de la red de distribución, siempre que éstos se encuentren bajo límites bajos de contaminación, y sean reparados a prontitud.

De acuerdo a Cánepa (CEPIS, 2004), el cloro residual en el sistema de distribución suele ser constante en sistemas en los cuales la operación de cloración se ha realizado durante periodos prolongados. Mientras que al iniciarse por primera vez el proceso de desinfección en un sistema, por lo general la demanda de cloro es muy alta, y va disminuyendo a través del tiempo, hasta volverse prácticamente constante.

El hecho que este valor se mantenga constante a través de todas las líneas de conducción, evidencia la buena calidad de las tuberías y sus elementos constitutivos, como quiebra gradientes y tanques de almacenamiento. Asegurando que la misma calidad del agua producida en la planta, sea la que recibe cada uno de los consumidores, para su bienestar y gratificación del esfuerzo de la ASADA en la producción de este líquido vital.

Cuadro 6.8. Determinación de cloro residual libre en el sistema de distribución.

Lugar de muestreo	Frecuencia de muestreo (días)	Cloro residual libre (ppm)
Efluente del tanque de cloración	1/2	0,5
Primera conexión: Soda "Fiesta la Manzana"	8	
Proyecto eólico	15	
Escuela de La Paz	15	
Punto más alejado en ramal La Paz	30	
Escuela de Frailes	30	
EBAIS de Frailes	30	
Puntos finales del sistema de distribución	60	

Con un flujo de 350ml/min, se obtuvo una concentración de cloro residual de 0,5 ppm desde la salida del tanque de cloración hasta la última conexión, siendo esta la dosis que satisface demanda total de cloro del sistema. Es decir esta es la dosis que se ofrece una concentración de cloro residual mínima de 0,5pmm hasta el último punto de la red, en condiciones normales, es decir sin contaminaciones excepcionales, fugas, u otros desperfectos. Es importante determinarla en cada sistema, ya que la demanda de cloro varía en función de las características del agua. Además los cambios súbitos en los resultados del cloro libre, constituyen una señal de alerta, por presencia de focos de contaminación.

6.3 Eficiencia global del tratamiento potabilizador

Debido a que el acueducto de Quebrada Yugo se constituye de dos tratamientos, el principal de FLA y el otro la barrera de desinfección con cloración, la calidad del agua depende de las eficiencias de ambos procesos, para obtener al final una calidad global del sistema potabilizador.

Como se ha comentado la eficiencia de la cloración depende de los resultados de la filtración, no se puede esperar un buen desempeño del desinfectante, sin que el agua que entra a este proceso haya sido antes mejorada en todos los aspectos, físicos químicos y microbiológicos. Es por esta razón que en el estudio de la eficiencia del proceso como un todo, conviene integrase también las eficiencias de cada una de las operaciones unitarias. De este modo se puede evaluar cuál engranaje es el que está funcionando adecuadamente y cuál no.

Los parámetros clásicos que incluyen las evaluaciones de FLA, tanto en la determinación de la conveniencia de desarrollar este tratamiento para una fuente dada, como para obtener el desempeño del proceso ya instalado, son los parámetros de color, turbiedad, coliformes totales y fecales.

En el caso del acueducto de La Sierra, ninguna de sus fuentes presenta color real. Cuando se suscita el arrastre de material por causa de las precipitaciones atmosféricas, el agua exhibe color aparente debido a los materiales suspendidos. En condiciones normales el líquido se muestra transparente, sin evidenciar alguna contaminación de color permanente. De modo que la evaluación de la calidad se enfoca en la determinación de los otros dos parámetros.

6.3.1 Muestreo para determinar eficiencia global

El muestreo se vio limitado por los cambios continuos de las fuentes de agua, realizados por primera vez en el acueducto, refiriéndose al hecho que se cambió la fuente abastecedora del acueducto en diversas ocasiones, incitados por los problemas de caudal y turbiedad.

Dado que en época lluviosa se experimentan condiciones de alta turbiedad, para evitar el paro del proceso de filtración, por la incapacidad de las unidades para procesar aguas tan turbias, se alimentó el acueducto solamente con el agua de la naciente. El aumento de caudal de esta última fuente, debido al incremento en las tasas de infiltración del terreno al percibir mayor cantidad de agua pluvial, permite que la tarea de abastecimiento del sistema recaiga únicamente sobre la naciente. No así en verano, por lo que al disminuir las lluvias se debía incrementar el caudal con el agua proveniente de la quebrada.

En los meses de octubre y diciembre, la primera mitad del mes de noviembre y setiembre del 2010 y enero del 2011, el acueducto solamente se alimentó con agua de la naciente, impidiendo el muestreo de picos de turbiedad en los momentos más intensos de la época lluviosa -objetivo del proyecto-. Mientras que los otros meses el caudal afluente se constituía de las aguas de la quebrada principalmente y de la naciente, restringiendo los muestreos a estos periodos.

6.3.2 Turbiedad dentro del ámbito aceptado por el sistema

El control automático permite la entrada de aguas con turbiedad ≤100 UNT. Para obtener la eficiencia del acueducto en remoción de turbiedad, cuando su valor se encuentra dentro de lo programado en el panal de control, se llevaron a cabo dos series de muestreos. Uno de éstos en los días en que no se presentaba precipitación y otro durante días lluviosos, ambos con un tamaño de muestra N igual a 19. En el muestreo uno los puntos muestreados comprenden la cámara de entrada del caudal al sistema, el agua filtrada en las canaletas y la salida del tanque de cloración o afluente de la planta. Mientras que en el muestreo dos se generaliza la turbiedad del afluente de la planta como ≤100 UNT, ya que interesa obtener la eficiencia de remoción dentro de ese ámbito y no las lecturas individuales de turbiedad entrante.

Con respecto al afluente en días no lluviosos se obtuvieron los resultados mostrados en el cuadro 6.9. El promedio de turbiedad corresponde a 5,22 UNT con desviación estándar de 2,26 UNT.

El muestreo del agua filtrada y del agua del efluente del tanque de cloración se realizó con el turbidímetro de columna (Figura A.7.58), cuyo límite de cuantificación inferior corresponde a 5 UNT. En ambos casos se obtuvieron siempre valores ≤ 5UNT. Así la eficiencia de remoción de turbiedad para el sistema de potabilización, es ≥50%, bajo los valores normales de turbiedad en el afluente de la planta, correspondiente a ≤10 UNT (Cuadro 6.9).

Cuadro 6.9. Registro de turbiedad del afluente a la planta Quebrada Yugo, durante el segundo semestre del 2010, en días carentes de precipitación húmeda.

Muestreo	Turbiedad (UNT)
1	1,4
2	2,65
3	3,17
4	5,44
5	3,69
6	7,12
7	6,81
8	4,33
9	9,26
10	3,64
11	4,79
12	3,94
13	8,46
14	4,97
15	4,12
16	6,78
17	9,45
18	5,91
19	3,18
N	**19**
Promedio	**5,22**
Desviación estándar	**2.26**
Distribución normal	**0.05**
Percentil 50%	**4.79**
Percentil 95%	**9.28**

Aún en los picos de turbiedad ≤100 UNT, se obtuvo los mismos resultados de ≤ 5UNT, en los puntos mencionados, siendo este último el valor requerido para un buen desempeño del proceso de cloración. Se obtiene una eficiencia global del sistema de ≥95% bajo picos de turbiedad ≤100 UNT en días lluviosos.

Concluyéndose entonces que los picos momentáneos de turbiedad ≤100 UNT no afectan la eficiencia de remoción de este valor. Pero si producen problemas de colmatación prematura en los filtros. La turbiedad es un parámetro limitante de la eficiencia de los FLA, y del proceso de cloración, por lo que debe mantenerse en promedio un valor ≤10 UNT (Galvis, 1992; CEPIS, 2002 y 2005), en el afluente del FLA, y ≤5 UNT, en el afluente del tanque de cloración (Galvis, 1992; CEPIS, 2004). Mientras que en el agua producida para consumo debe encontrarse ≤5 UNT, como nivel máximo permitido, y ≤ 1 UNT como valor recomendado, de acuerdo con el Reglamento para la Calidad del Agua Potable (Decreto Nº 32327-S).

6.3.3 Calidad microbiológica

Se realizó la cuantificación de los grupos de bacterias que conforman los coliformes totales y fecales, por ser microorganismos indicadores de la eficiencia en remoción de cada operación unitaria de la planta. Y para determinar el porcentaje de deducción de éstos se llevó a cabo una serie de 6 muestreos del agua, en cada uno se colectaron 4 muestras (para un total de 24 muestras procesadas) provenientes de puntos estratégicos del acueducto, a saber, afluente de la planta, sobrenadante, canaleta de filtración y efluente de la planta. Los muestreos se realizaron durante el periodo en que el suministro de la planta se encontraba dado por la quebrada y la naciente. Tanto el sobrenadante como el agua filtrada corresponden en todos los casos al filtro 1.

La reducción de la carga microbiológica en el agua producida por el acueducto evaluado, se debe tanto al proceso de FLA, como a la desinfección del cloro. En los cuadros 6.10 y 6.11 se muestran los resultados para coliformes totales (CT) y fecales (CF) de la totalidad de puntos y el promedio para cada punto muestreado. El promedio de NMP de bacterias por cada cien militros de muestra (en adelante solo NMP), para el agua cruda de entrada es de 1003 CT y de 42,8 CF, mientras que en el sobrenadante corresponde a 410 CT y 31 CF.

Se descarta así la ocurrencia de contaminación externa adicional en el almacenamiento momentáneo del sobrenadante en el periodo muestreado, por el contrario, el NMP de CT se reduce en un 59% y en un 27,6% para CF, lo cual podría deberse a un efecto de dilución con las aguas entrantes menos cargadas. Para asegurar esto se debería recolectar una serie de muestras en diferentes puntos y profundidades del sobrenadante.

Cuadro 6.10. Determinación de coliformes totales, por el método de NMP en el acueducto Quebrada Yugo.

Punto de muestreo	Tipo de agua	Muestreo						
		NMP/100mL						
		1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**Promedio**
Afluente de la planta	Cruda	1600	540	1600	140	540	1600	1003
Sobrenadante*	Cruda	79	540	920	220	350	350	410
Canaleta de filtración*	Filtrada	13	4,5	11	33	13	49	20,6
Efluente de la planta	Clorada	<1,1	<1,1	<1,1	<1,1	<1,1	<1,1	<1,1

*Perteneciente al FLA 1.

Cuadro 6.11. Determinación de coliformes fecales, por el método de NMP en el acueducto Quebrada Yugo.

Punto de muestreo	Tipo de agua	Muestreo						
		NMP/100mL						
		1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**Promedio**
Afluente de la planta	Cruda	170	33	26	4,5	2	21	42,8
Sobrenadante*	Cruda	22	46	49	2	17	49	31
Canaleta de filtración*	Filtrada	2	<1,8	2	<1,8	<1,8	3,7	2,2
Efluente de la planta	Clorada	<1,1	<1,1	<1,1	<1,1	<1,1	<1,1	<1,1

*Perteneciente al FLA 1.

6.3.3.1 Eficiencia de remoción de los FLA

El proceso de FLA reduce en un 97,9% las bacterias CT y un 94,9% de CF (Cuadro 6.12), lo que significa una eficiencia de remoción de 2 log para CT y de 1 log para fecales. Esto tomando el promedio de NMP del afluente de la planta para los cálculos. Lo cual demuestra que el peso de reducción de la población microbiana recae sobre el tratamiento de filtración, tal y como se requiere que sea en un sistema de potabilización con aguas crudas turbias.

La eficiencia de remoción en un FLA puede ir de 3 a 4 log y de 0 a 2 log, para el proceso con filtro maduro y al iniciar la carrera filtrante, respectivamente, dependiendo de la carga microbiológica inicial. Mientras que para CF la remoción puede ir de 1a 4 log por parte de un filtro maduro, y al inicio de la carrera puede ser nula. (CEPIS, 1992)

La eficiencia de reducción de microorganismos patógenos por parte de la filtración lenta en arena, es una de sus ventajas más conocidas y estudiadas, que hacen de este proceso una buena opción de tratamiento de las aguas, brindando además de remoción química y física, la microbiológica.

6.3.3.2 Eficiencia de remoción microbiológica de la cloración

La cloración es el método más utilizado para llevar a cabo el proceso bactericida como barrera de protección final del agua en un sistema de potabilización, debido a su eficiencia, bajo costo, efecto residual, disponibilidad y facilidad de aplicación.

El agua filtrada presenta un promedio de NMP de CT correspondiente a 20,6 y de 2,2 CF. La cual es llevada al proceso de cloración saliendo negativa para CT, en todos los muestreos, reportándose un promedio de NMP <1,1 el cual corresponde al límite de cuantificación del método de tubos múltiples. Lo cual significa de un 94,7% a 100% de eficiencia en remoción de CT (Cuadro 6.12), para una reducción de 1 log. Dando negativa la prueba de CT se da por negativa para CF, obteniéndose entonces una eficiencia entre 18,2% y 100% de remoción de CF en la cloración (Cuadro 6.12.), igualmente una reducción de 1 log.

6.3.3.3 Eficiencia global de remoción microbiológica del sistema

De este modo las operaciones unitarias de filtración lenta y cloración producen en conjunto una remoción >99,9% para CT y >97,4 para CF, siendo esta la eficiencia global del sistema de potabilización para estos parámetros. Cumpliendo entonces con lo estipulado en los aspectos microbiológicos del Reglamento para la Calidad del Agua Potable (Decreto Nº 32327-S) que establece como "negativo" el valor requerido para CF, equivalente al de cuantificación inferior del método, <1,8 y <1,1 NMP/100ml para CT y CF respectivamente.

Cuadro 6.12. Eficiencia de remoción global y de las operaciones unitarias de potabilización del acueducto Quebrada Yugo.

Proceso	CT Promedio (NMP/100mL)		CF Promedio (NMP/100mL)		Eficiencia Remoción (%)	
	Entrada proceso	**Salida proceso**	**Entrada proceso**	**Salida proceso**	**CT**	**CF**
Filtración*	1003	20,6	42,8	2,2	97,9	94,9
Cloración	20,6	<1,1	2,2	<1,1	94,7 a 100	18,2 a 100
Global	1003	<1,1	42,8	<1,1	>99,9	>97,4

*Perteneciente al FLA 1.

Se realizó un único muestreo de CT y CF en el agua de la naciente y de la quebrada. En cuanto a la primera se obtuvo 540 NMP/100 y <1,8 NMP/100 para CT y CF respectivamente, mientras que para el agua de quebrada los valores corresponden a 1600 NMP/100 y 170 NMP/100. Notándose que la naciente no contiene CF, aunque si CT, y la quebrada posee valores muy altos, al igual que los reportados en el afluente de la planta.

6.3.3.4 Remoción de *Pseudomonas aeruginosa*, y *Enterococcus faecalis*

Se analizaron estos microorganismos en el agua del afluente y efluente de la planta, con tres muestreos, en cada uno se tomó una muestra de los puntos mencionados, para un total de 6 muestras. A estas muestras se les analizó simultáneamente *Pseudomonas aeruginosa*, y *Enterococcus faecalis*, trabajando un volumen de 1 ml para agua cruda y 50 ml para agua clorada, por el método de filtración, e incubadas con Cetrimide y Aside respectivamente a 35ºC.

Los resultados muestran cantidad incontable de UFC en 5 de los casos para agua cruda tanto para *Pseudomonas aeruginosa* como para *Enterococcus faecalis*, 3 y 2 respectivamente. Mientras que es así solamente para dos de los seis resultados de agua clorada, 1 incontable para *Pseudomonas aeruginosa*, y 1 incontable de *Enterococcus faecalis*, obtenidos en la misma muestra la 2. Esta muestra posee un cloro residual de 0,2 ppm y fue tomada en conjunto con el muestreo 2 para CT y CF, los cuales dieron negativos a la salida del sistema (Cuadro 6.13).

Cuadro 6.13. Análisis de *Pseudomonas aeruginosa y Enterococcus faecalis*, en el afluente y efluente del acueducto Quebrada Yugo.

Microorganismo indicador	Muestreo	Caudal afluente a la planta	Caudal efluente de la planta
		UFC/1ml	UFC/50ml
Pseudomonas aeruginosa	1	incontable	0
	2	incontable	incontable
	3	incontable	0
Enterococcus faecalis	1	incontable	1
	2	49	incontable
	3	incontable	0

Esto demuestra que *Pseudomonas aeruginosa* y *Enterococcus faecalis* pueden estar presentes en al agua tratada, aún cuando los CT y CF están ausentes. De modo que aunque el agua se catalogue de calidad apta para consumo humano, a través del grupo coliforme, no significa la ausencia de riesgo microbiológico, pudiéndose encontrar *Pseudomonas aeruginosa* y *Enterococcus faecalis*, indicadores de contaminación fecal y de la presencia de otros microorganismos patógenos. Habiendo un mayor riesgo de contraer enfermedades entéricas con aguas de consumo con altos niveles de Enterococos (Marchand, 2002).

Debido a que los microorganismos indicadores de calidad en agua deben cumplir con una serie de aspectos enumerados en el punto d del Anexo 2, de los cuales los CT y CF presentan serias deficiencias, como sobrevivir en el agua y presentar mayor resistencia a los desinfectantes, con respecto a los microorganismos patógenos. Además su ubicuidad en la naturaleza y capacidad de multiplicarse fuera del intestino son desventajas del uso de estos grupos.

Todo ello conlleva a que su utilidad como indicadores se vea cuestionada y que algunos países cambiaran sus normas, sustituyéndolos por otros microorganismos más eficientes. *Pseudomonas aeruginosa*, y *Enterococcus faecalis*, son dos de los indicadores superiores utilizados para la determinación de la calidad de agua, siendo este último el mejor indicador bacteriano de calidad. Debido a que son mucho menos vulnerables a la acción de los desinfectantes, por la protección brindada por sus densas membranas, por sus genes de resistencia a antibióticos, por su persistencia, sobrevivencia aun en condiciones extremas y su vinculación con contaminación fecal humana más que animal. Es por esto que la inserción de estos dos indicadores en el control en la determinación de la calidad del agua cobra relevancia, no solo para el agua producida y sino también para evaluar los sistema de distribución.

Por estos motivos se recomienda incluir estos indicadores de calidad y eficiencia en las pruebas periódicas que realiza la ASADA, no solamente a la salida de la planta, sino en los sistemas de distribución. Por su resistencia al secado pueden ser utilizados para realizar controles sistemáticos en las tuberías de distribución, así como para detectar focos de la contaminación.

6.1. Idoneidad del Tratamiento de FLA con respecto al agua cruda actual

Los sistemas FiME se ven limitados por distintos parámetros en el agua cruda como lo son turbiedad, sólidos suspendidos, color y carbono orgánico y grado de contaminación microbiológica. Además de la temperatura, el OD, nutrientes concentración de hierro, manganeso y algas. (Galvis, 1992)

A pesar que todos son importantes para determinar si el agua cruda es adecuada para el tratamiento FiME -incluido el FLA actual de la planta-, los primeros son determinantes pues constituyen los parámetros que la FiME está destinada a mejorar. Mientras que los segundos indican si se requiere algún tratamiento previo o complementario para acondicionar el agua.

En el caso de la planta potabilizadora Quebrada Yugo se determinó la turbiedad y el grado de contaminación microbiológica, tratados en detalle anteriormente. En cuanto a la carga microbiana se obtuvo que la planta presenta una eficiencia en remoción >99,9% para CT y >97,4 con el tratamiento global de potabilización de FLA y cloración. Y que bajo condiciones adecuadas de cloración (turbiedad ≤5 UNT y cloro residual libre de 0,5 ppm) se obtienen valores aceptables de *Pseudomonas aeruginosa*, y *Enterococcus faecalis* (Sección 6.3.3.4). Esto bajo condiciones normales de turbiedad en el afluente a la planta, es decir ≤10 UNT.

Por otro lado la eficiencia en reducción de turbiedad es ≥95% con los picos eventuales de hasta 100 UNT registrados y cuando predominan los valores menores de 10 UNT (Sección 6.3.2). También se registraron los picos de turbiedad (≥ 500 UNT) en época de lluvias (a los cuales no se someten los FLA ya que el valor máximo permitido es de 100 UNT), utilizando el turbidímetro automático de la planta, cuyo límite de cuantificación superior es de 1000,00 UNT. Obteniéndose un promedio de 895,89 y desviación estándar de 142,11, con picos comprendidos entre 573,62 UNT y ≥1000, en una muestra de tamaño N igual a 19 (Cuadro 6.14). Lo cual indica que en el periodo lluvioso se sobrepasan los límites aceptados para tratamiento por FiME y mucho más para el sistema de FLA. La planta se encuentra programada de modo que reciba caudales con turbiedad de hasta 100 UNT, momentáneamente, reanudando el paso hasta que los niveles disminuyan a 30 UNT.

Sin embargo los constantes picos de turbiedad por encima de este valor, provocan serias contrariedades en la eficiencia, la operación y el mantenimiento del sistema. Lo cual demuestra que el principal problema de turbiedad es causado por el arrastre de sólidos, al aumentar el caudal de la quebrada.

Cuadro 6.14. Registro de picos de turbiedad (≥ 500 UNT) del afluente a la planta Quebrada Yugo, durante el segundo semestre del 2010.

Muestreo	Turbiedad (UNT)
1	≥1000
2	≥1000
3	864,31
4	917,24
5	965,93
6	926,15
7	≥1000
8	628,33
9	792,67
10	≥1000
11	≥1000
12	758,56
13	≥1000
14	989,17
15	≥1000
16	941,87
17	573,62
18	≥1000
19	664,06
N	**19**
Promedio	**895,89**
Desviación estándar	**142,11**
Distribución normal	**0,77**
Percentil 50%	**965,93**
Percentil 95%	**1000**

La FLA es un tratamiento diseñado para operar con su mayor eficiencia con turbiedades ≤ 10 UNT (CEPIS, 2003; Galvis, 1999; Ceabsy et al; Hendricks y Bellamy citados por Galvis, 1999) disminuyendo ésta con valores dentro del rango de 30 a 40 UNT.

Los valores picos deben encontrarse entre 50 a 10 UNT, en cuyo caso sólo puede permitirse el paso por un periodo muy corto -un par de horas en uno o dos días- (Galvis, 1999). Debido a que el agua colmatará rápidamente el FLA, disminuirá su eficiencia y se consumirá toda la carga hidráulica disponible. Como lo demuestran las cortas carreras de filtración que alcanzan los FLA de la planta de Quebrada Yugo y el grado de colmatación de su lecho. Kumar (2004) reporta una disminución de las carreras filtrantes a 17 días, cuando la turbiedad alcanza valores de 7 a 12 UNT, mientras que con turbiedades comprendidas entre 1 a 2 UNT las carreras de FLA experimentales, llegan hasta 58 días. Por lo que es sorprendente que con los constantes picos de turbiedad que se presentan en el afluente analizado, los FLA lleven a cabo el proceso de tratamiento y se obtengan los resultados expuestos anteriormente.

Por tanto se concluye que de acuerdo a las condiciones actuales de turbiedad de las fuentes de abastecimiento, el tratamiento de FLA no es el idóneo, comprobando la hipótesis establecida. Y explica la principal causa de la problemática que vive actualmente el acueducto. Sin embargo por otra parte estos resultados también permiten concluir que los FLA han desempeñado su función en remoción microbiológica y de turbiedad, aún bajo condiciones inadecuadas del afluente, de operación y mantenimiento. Y a pesar de esto último sigue siendo el tratamiento potabilizador principal del acueducto, confirmándose su eficiencia.

6.4.1. Problemática desencadenada por la frecuente alza de los valores de turbiedad en el agua cruda

El arrastre de sólidos debido a las lluvias trae por consecuencia el atascamiento de la captación de agua en la quebrada, el colapso de los desarenadores, paso de sólidos gruesos que obstruyen la tubería y que llegan hasta la planta. Esto a su vez desencadena una serie de problemas que ponen en evidencia las deficiencias del sistema. Debido a que el personal se debe trasladar a la captación constantemente para retirar el material que obstruye la toma, para limpiar los desarenadores, así como reparar los problemas provocados a lo largo de la tubería. Por los problemas de diseño en los desarenadores y la toma, su limpieza requiere arduo trabajo y mucho tiempo, consumiendo la mayoría del día en la atención de los problemas en la toma y los desarenadores.

Ya que el arrastre puede ocurrir a cualquier hora, el fontanero debe recurrir a solucionar los contratiempos tanto de noche como de día. Aunado a esto no se cuenta con las condiciones, equipo y transporte requeridos para realizar este trabajo efectivamente.

Pero a la vez que es imprescindible trasladarse a la fuente también es necesaria la presencia del personal en la planta para el funcionamiento, regulación y supervisión del medidor automático de turbiedad, el control de las válvulas y bombas tanto de los filtros, del tanque de contacto como del suministro de agua. Asimismo se debe regular el cambio drástico de volumen de agua en el tanque de contacto y la dosificación de cloro.

La constante alza en los valores de turbiedad por encima de los recomendados, provoca la rápida colmatación de los FLA. Lo cual se ve reflejado en el rápido consumo de carga hidráulica, con cortas carreras de filtración, de menos de un mes, fuera de los límites sugeridos. Dificultando las tareas de mantenimiento, por ser requeridas frecuentemente.

Por otra parte cuando se aumenta la turbiedad se debe llevar a cabo un control riguroso de los filtros con el fin de evitar la penetración de aire al cortarse el ingreso de caudal, el desacomodo del estrato de arena, la regulación de la velocidad de filtración de acuerdo a la variación y disminución del caudal de entrada. El equipo de medición de turbiedad también debe ser celosamente revisado, ya que debe tener suministro eléctrico, alimentación de caudal requerido para realizar la lectura, y que la apertura y cierre del sistema de alimentación sea adecuada y oportuna.

El medidor de turbiedad debe estar libre de suciedades y sólidos que interfieran, dando una lectura muy por debajo o por encima del valor real. El aire acumulado por la variación del caudal también puede causar inconsistencias en la medición de turbiedad. En estas circunstancias de arrastre, las partículas gruesas atascadas en el sistemas o la falta de flujo, pueden provocar que se reconecte el sistema de alimentación aún cuando los valores reales están por encima de 100 UNT, haciendo colapsar los filtros.

Por otro lado el paso de sólidos gruesos como semillas y hojas, por la deficiencia de los desarenadores o la captación para retenerlos, puede hacer que se cierre el paso debido a valores erróneos muy altos, cuando en realidad la turbiedad se encuentra normal, deteniendo el proceso de potabilización. De modo tal que aunque el sistema sea automático requiere de supervisión constante.

Al quedar la planta sin alimentación se compromete el suministro de agua potable a las comunidades dependientes del acueducto. Lo cual ocasiona malestar en los vecinos, ya que no poseen conocimientos de las razones por las que esto ocurre, por lo que llaman para increpar constantemente al fontanero y los miembros de la ASADA, poniendo en duda su trabajo.

Dados estos problemas causados por la turbiedad se realizó un cambio en la fuente de agua al retirar el abastecimiento por parte de la quebrada, y aumentar el proveniente de la naciente. Ya que la naciente no fue captada completamente, esta presentaba un caudal remanente, el cual fue colectado rústicamente con el fin de verificar si podría sustituir la alimentación de la quebrada, y así disminuir los problemas de arrastre y turbiedad. Este cambio fue realizado por primera vez en el año 2010, ya que siempre la planta dependía del abastecimiento de fuentes superficiales. Sin embargo al entrar la época de verano el caudal de la naciente mermó significativamente, haciendo necesario volver a habilitar la captación de la quebrada.

6.4.2 Causas de la problemática relacionada con la alta turbiedad del afluente y soluciones

La situación descrita posee diferentes causas, entre ellas el aumento de agua pluvial, el arrastre de sólidos, las condiciones geomorfológicas de la quebrada, deficiencias en el diseño de la captación -especialmente en la quebrada-, y en los desarenadores.

Estas causas se encuentran interrelacionadas, la avenida de lluvias y la geomorfología del cauce del río, provocan el arrastre de sólidos, lo que a su vez causa una gran problemática debida a la incapacidad de la captación de retener y cribar el caudal. Por lo cual el material ingresa al sistema y satura los desarenadores y los FLA, paralizando el sistema. Algunas soluciones a esta situación consisten en cambios relacionados con:

a. El diseño de la captación de la quebrada.
b. El diseño de los desarenadores.
c. Diseño de pre-tratamientos (pozo y galerías de infiltración, sedimentación).
d. Diseño de sistema FiME que permita el tratamiento de los valores pico, adicionando un sistema de FGDi previo a la FLA.
e. Nuevas fuentes de abastecimiento.

Las opciones se resumen en dos, el cambio del tratamiento de potabilización actual o el cambio de las fuentes de agua. Sin embargo realizar una combinación de ambas es posible. Debido a que realizar un cambio radical del tratamiento potabilizador no es factible económicamente, ni es la opción correcta dado que se tiene la opción de realizar pequeños cambios en el diseño, así como tomar nuevas fuentes de agua que posean menos carga de material de arrastre.

Actualmente la ASADA se encuentra en proceso de consulta con el AyA, para determinar la factibilidad de tomar dos nacientes cercanas, con el fin de poner fin a los problemas tratados.

6.4.3 Propuesta de mejora del tratamiento

Por las razones anteriormente analizadas se propone primero llevar a cabo un estudio de capacidad de suministro y demanda actual. Ya que el número de abonados aumenta, al igual que el consumo, generando áreas sensibles donde el suministro no es totalmente eficiente.

Debido a que el caudal de las nacientes depende directamente de la tasa de infiltración, los cambios bruscos en el flujo, como se presentan en la naciente captada actualmente, no permitirían que la planta dependiera exclusivamente de estas fuentes.

Sin embargo estas fuentes pueden aminorar la problemática en época lluviosa, que es dónde su caudal aumenta mientras que el de la quebrada baja su calidad. Por esto es necesario llevar a cabo el estudio de las nuevas fuentes de agua subterránea, que se desea incorporar al sistema, junto con la quebrada actual, para determinar cuantitativamente cambios de flujo con respecto a estación seca y lluviosa. No se puede depender de nacientes unicamente

Aún si se llegara a incorporar esas nuevas fuentes, es imperativo corregir las deficiencias señaladas en diseño de la captación y de los desarenadores. Porque con ello se lograría disminuir notablemente el arrastre de sólidos dentro del sistema, y conjuntamente los valores de turbiedad.

Pero todavía con esto no sería suficiente para proteger a los FLA de los picos de turbiedad, ni eliminar la problemática causada por las aguas pluviales. Si el agua cruda aún presenta una turbiedad constante, con valores mayores de 25 UNT, se debe llevar a cabo un pre-tratamiento al FLA (Galvis, 1999). Es aquí donde la FiME reluce como la opción que conserva los beneficios de la FLA, a la vez que aumenta su rango de tratamiento.

Debido a que la FiME implica la combinación de FG y FLA, es más eficiente en la remoción de sólidos de rápida sedimentación. La FG se encuentra diseñada para producir efluentes con niveles <10-20 UNT y sólidos suspendidos <5 ppm (Galvis, 1999), los valores ideales para operación de la FLA.

De acuerdo a los valores de turbiedad, CF y color real en el agua cruda, se puede clasificarla en un rango de bajo, intermedio y alto (Cuadro 6.15), para luego proceder a escoger una serie de tratamientos FiME (Cuadro 6.16).

Cuadro 6.15. Resumen de rangos de calidad de agua en fuentes superficiales para orientar la selección de opciones de FiME (CEPIS, 2005).

RANGO	NIVEL PROMEDIO
Bajo	Turbiedad < 10 UNT Coliformes Fecales < 500 UFC/100 ml Color Real < 20 UPC
Intermedio	Turbiedad 10 - 20 UNT Coliformes Fecales 500 - 10000 UFC/100 ml Color Real 20 - 30 UPC
Alto	Turbiedad 20 - 70 UNT Coliformes Fecales 10000 - 20000 UFC/100 ml Color Real 30 - 40 UPC

Cuadro 6.16. Modelo para la selección de un sistema de tratamiento de agua por filtración en múltiples etapas, FiME. (Todas las opciones incluyen FGDi 2.0 y FLA0.15)

Coliformes Fecales (UFC/100 ml) \ Turbiedad (UNT) / Color Real (UC)	< 10 / < 20	10-20 / 20-30	20-50 / 30-40	50-70 (*) / 30-40 (*)
< 500	Sin FGA	$FGAC_{0.6}$	$FGAC_{0.45}$	$FGAS3_{0.3}$
500 - 10000	$FGAC_{0.6}$	$FGAC_{0.6}$	$FGAC_{0.45}$	$FGAS3_{0.3}$
10000 - 20000 (*)	$FGAC_{0.45}$	$FGAC_{0.45}$	$FGAC_{0.45}$	$FGAS3_{0.3}$

(*) Para valores superiores a 70 UNT; 20000 UFC/100 ml o 40 UC, se recomienda realizar estudio en planta piloto.
(El subíndice indica la velocidad de filtración recomendada en m/h)

Clasificación de fuentes según el rango de calidad :

- Bajo
- Medio
- Alto

FGDi - FILTRO GRUESO DINAMICO
FGAC - FILTRO GRUESO ASCENDENTE EN CAPAS
FGAS3 - FILTRO GRUESO ASCENDENTE EN SERIE (3 ETAPAS)
FGH3 - FILTRO GRUESO HORIZONTAL (3 ETAPAS)
FLA - FILTRO LENTRO ARENA

Todas las opciones FiME incluyen FGDi y FLA. Ya que el FGDi es utilizada para *"reducir los extremos de los picos de turbiedad y proteger de esta manera la planta de tratamiento ante altas cargas de sólidos transportadas por la fuente durante unas pocas horas. Cuando la fuente transporta valores elevados de sólidos fácilmente sedimentables, estos se depositan en la superficie del lecho de grava, colmatándolo el filtro rápidamente y restringiendo parcial o totalmente el paso de agua. Esta respuesta protege las unidades de tratamiento siguientes, en este caso la FLA."* (CEPIS, 2005)

Los FGDi pueden realizar el tratamiento efectivo de afluentes con valores diarios máximos de 50 UNT (Cuadro 6.17). Cuando la turbiedad del agua cruda sobrepase este valor, se debe instalar un sistema de pre-tratamiento (Cepis, 2003).

Por las condiciones actuales de la planta de Quebrada Yugo y las ventajas enumeradas de la FG, que se determinó diseñar un FGDi para planta. Sin que esto signifique que por sí mismo pueda solucionar los problemas actuales del sistema, se debe primero realizar los cambios señalados, como se aclaró anteriormente. El objetivo del FGDi diseñado será proteger los FLA de los picos de turbiedad hasta 50 UNT, y mejorar su desempeño. Aunque en el cuadro 6.15 no se señalan limitaciones para la carga de bacterias coliformes, Galvis (1999) señala que estos filtros pueden recibir hasta 45000 UFC/100ml, con valores mayores de dimensiones de las cajas filtrantes y velocidades superficiales menores, que se traducen en un mayor costo.

Cuadro 6.17. Valores guía sobre la calidad del agua para elegir un FGDi (Cepis 2003).

Compuesto	Remoción (%)	Valores-guía (niveles máximos)
Turbiedad	75	< 50 UTN > 50 UTN con pretratamiento
Color	25	5 – 10 Pt – Co
Carbono orgánico total	25	Ninguna
Bacterias coliformes	99-99,99	Ninguna
Quistes de Giardia	99,9-99,99	10 – 50 quistes/m^3

6.4.4. Diseño del FGDi para la planta Quebrada Yugo

En el siguiente capítulo se detalla el procedimiento utilizado para el diseño de un FGDi acorde a las características del acueducto Quebrada Yugo, se resalta además los principales resultados y los planos de la estructura.

CAPÍTULO VII

DISEÑO DEL FILTRO GRUESO DINÁMICO

CAPÍTULO VII
DISEÑO DEL FILTRO GRUESO DINÁMICO

7.1. Elementos de un FGDi

Los elementos esenciales de un FGDi son: cámara de entrada y de disipación, vertederos, cámara de recuperación de arena, caja del filtro, sistema de drenaje, el conducto de rebose, sistema de control del agua filtrada, lecho de soporte y lecho filtrante.

El principio del tratamiento FGDi en es el mismo de un FLA, incluyendo el desarrollo de población microbiana coadyuvante. Sin embargo la principal diferencia estriba en que el lecho filtrante ocupa la totalidad de la caja, y no existe un sobrenadante como en el FLA. Sino una pequeña película de agua que pasa constantemente sobre el lecho sin ser filtrada, la cual arrastra los sólidos más gruesos.

7.2. Procedimiento de diseño

El proceso matemático, las fórmulas y variables utilizadas, así como los valores de diseño (Cuadro 7.1), se describe en el Anexo 4, basado en la "Guía para diseño de sistemas de tratamiento de Filtración en múltiples etapas" de CEPIS (Cepis, 2005) y en el libro "Filtración Lenta" de Felipe Solsona (CEPIS, 2003),.

Cuadro 7.1. Resumen de principales parámetros de diseño para FGDi (Cepis, 2005).

Criterio	Valores Recomendados
Período de diseño (años)	8 - 12
Período de operación (h/d) (*)	24
Velocidad de filtración (m/h)	2 - 3
Número mínimo de unidades en paralelo	2
Area de filtración por unidad (m^2)	< 10
Velocidad superficial del flujo durante el lavado superficial (m/s)	0.15 - 0.3
Lecho Filtrante	
. Longitud (m)	0.6
. Tamaño de gravas (mm)	Según Tabla
Altura del vertedero de salida (m)	0.03-0.05 (**)

(*) En estaciones de bombeo de agua con períodos de bombeo inferiores a 24 h/día, se recomienda proyectar un almacenamiento de agua cruda, a partir del cual se suministre agua de manera continua al FGDi y demás componentes.
(**) Medidos a partir del lecho superficial de grava fina.

7.3. Diseño de FGDi para la planta potabilizadora Quebrada Yugo

7.3.1. Proceso de diseño de FGDi para la planta de Quebrada Yugo

El procedimiento de diseño, se realizó por medio del programa Excel, con ayuda del Ing. Jorge Calvo Gutiérrez (Figura 7.1). El proceso digital permite hacer las comprobaciones de cumplimiento de valores establecidos, la totalidad del proceso puede ser consultada en el Anexo 5. Los principales datos de entrada corresponden al caudal de la planta, velocidad de filtración, ancho del filtro, velocidad de lavado y número de laterales. Todos adecuados a la planta potabilizadora de Quebrada Yugo.

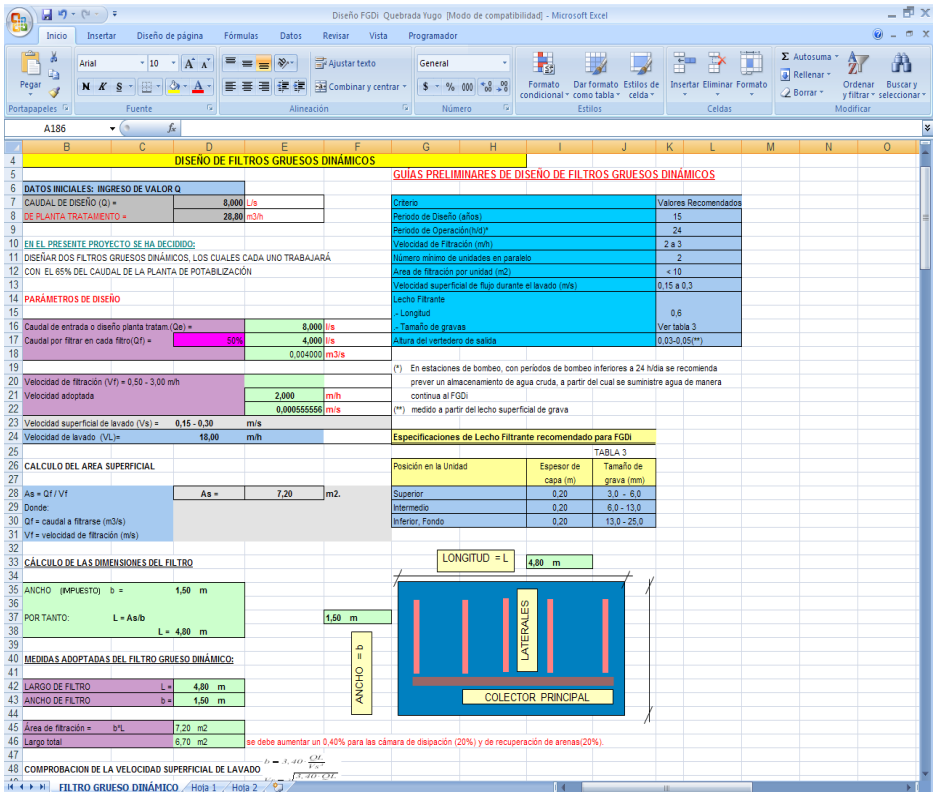


Figura 7.1. Programa utilizado para desarrollar el proceso de diseño de la FGDi.

7.3.2. Valores de los principales parámetros obtenidos

En el cuadro 7.2 se muestran los principales valores obtenidos del FGDi diseñado para la planta potabilizadora de Quebrada Yugo.

Cuadro 7.2. Principales resultados del diseño del FGDi para la planta potabilizadora de La Sierra.

Parámetro de diseño	Valor obtenido
Caudal de diseño (m3/s)	0,004
Ancho (m)	1,5
Largo (m)	4,80
Pared del filtro (m)	1,1
Velocidad superficial de lavado (m/s)	0,24
Lecho filtrante y de soporte	Cuadros A.4.1 y A.4.2
Altura del agua del vertedero de entrada (m)	0,01
Cámara disipación (m)	
Largo	1,10
Ancho	3,20
Cámara recuperación arena (m)	
Largo	1,10
Ancho	3,20
Número de laterales	6
Longitud de lateral (m)	1,21
Separación entre Laterales (m)	0,90
Número de orificios por lateral	30
Separación entre orificios (m)	0,08
Diámetro del orificio (pulg)	1/2
Diámetro de tubo principal (pulg)	6
Diámetro de laterales (pulg)	4
Separación de tapón y pared (m)	0, 10
Separación de Tee y orificios (m)	0,04

7.3.3 Planos del FGDi

Los planos del FGDi para el acueducto Quebrada Yugo, incluyen 6 planos así: vista principal (superior), y cinco cortes indicados en esta vista, a saber, cortes A-A' B-B' C-C' D-D' y E-E'(Figuras 7.2-7.7), basados en los planos de RANAS. El manual de operación y mantenimiento del FGDi se incluye en el Anexo 6.

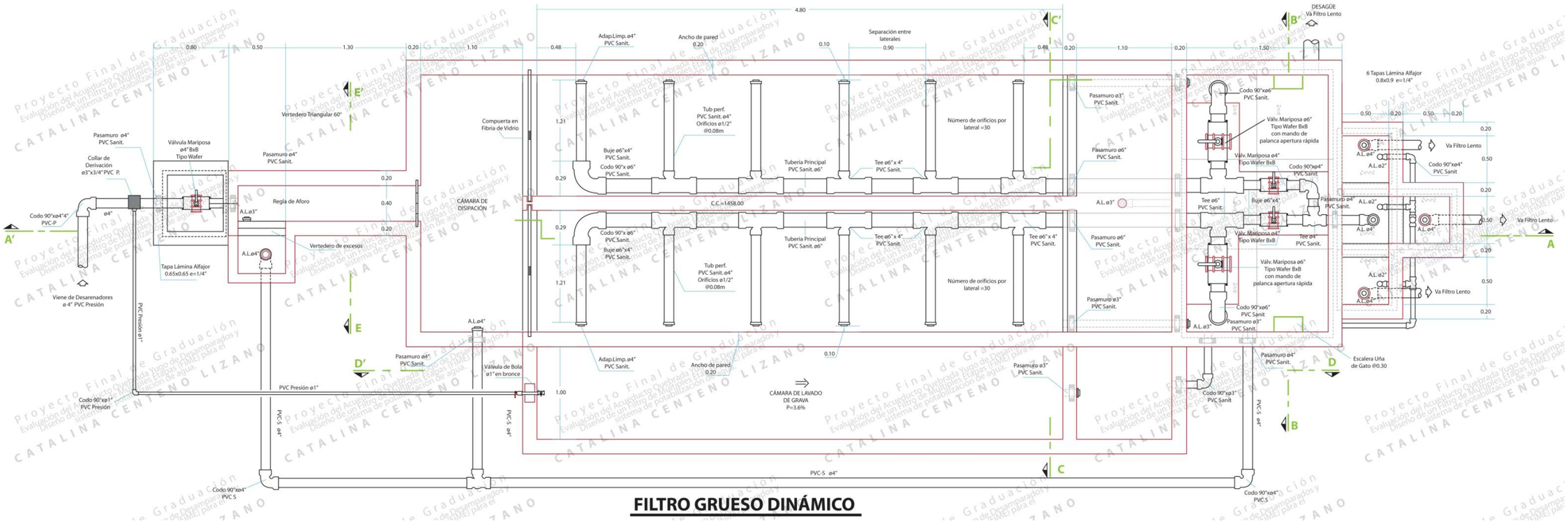


Figura 7.2. Vista principal del FGDi diseñado para el acueducto Quebrada Yugo.

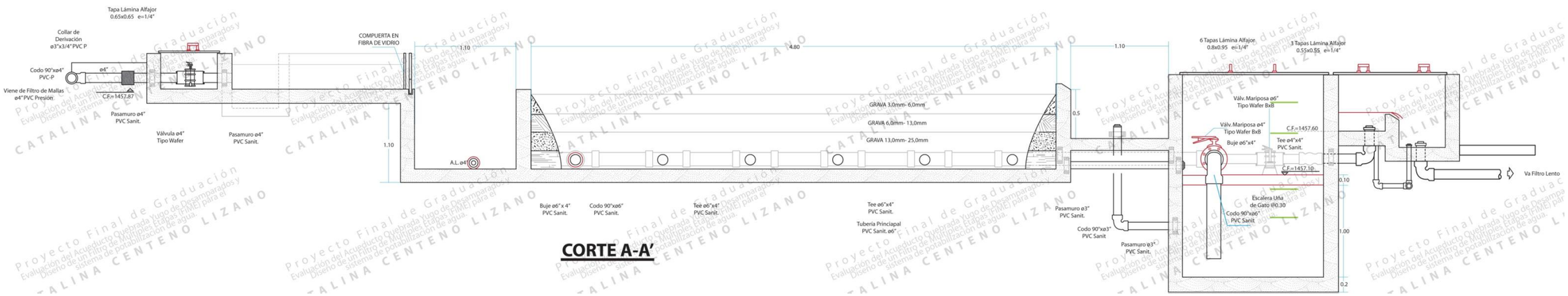


Figura 7.3. Corte A-A` del FGDi diseñado para el acueducto Quebrada Yugo.

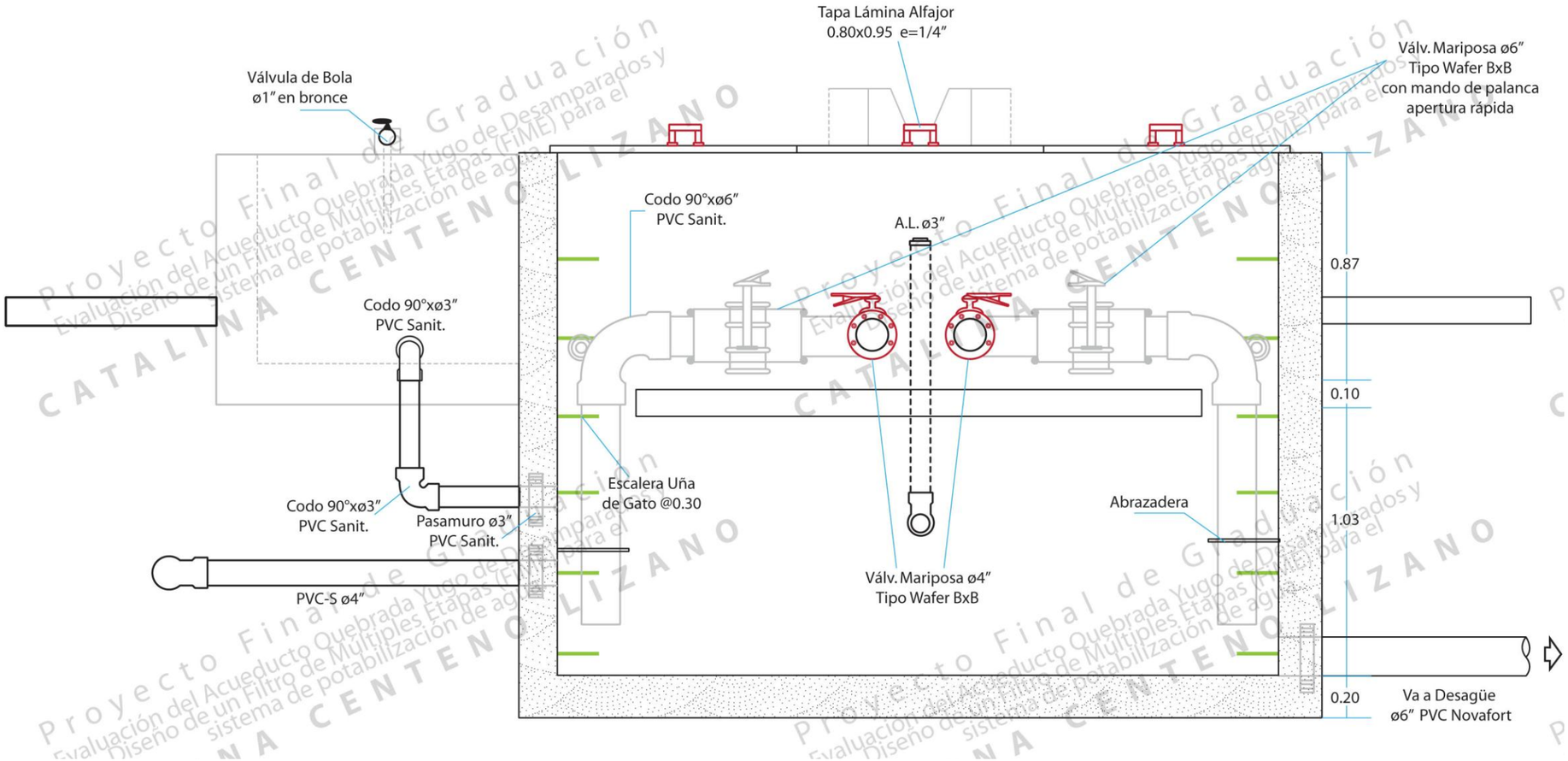


Figura 7.4. Corte B-B` del FGDi diseñado para el acueducto Quebrada Yugo.

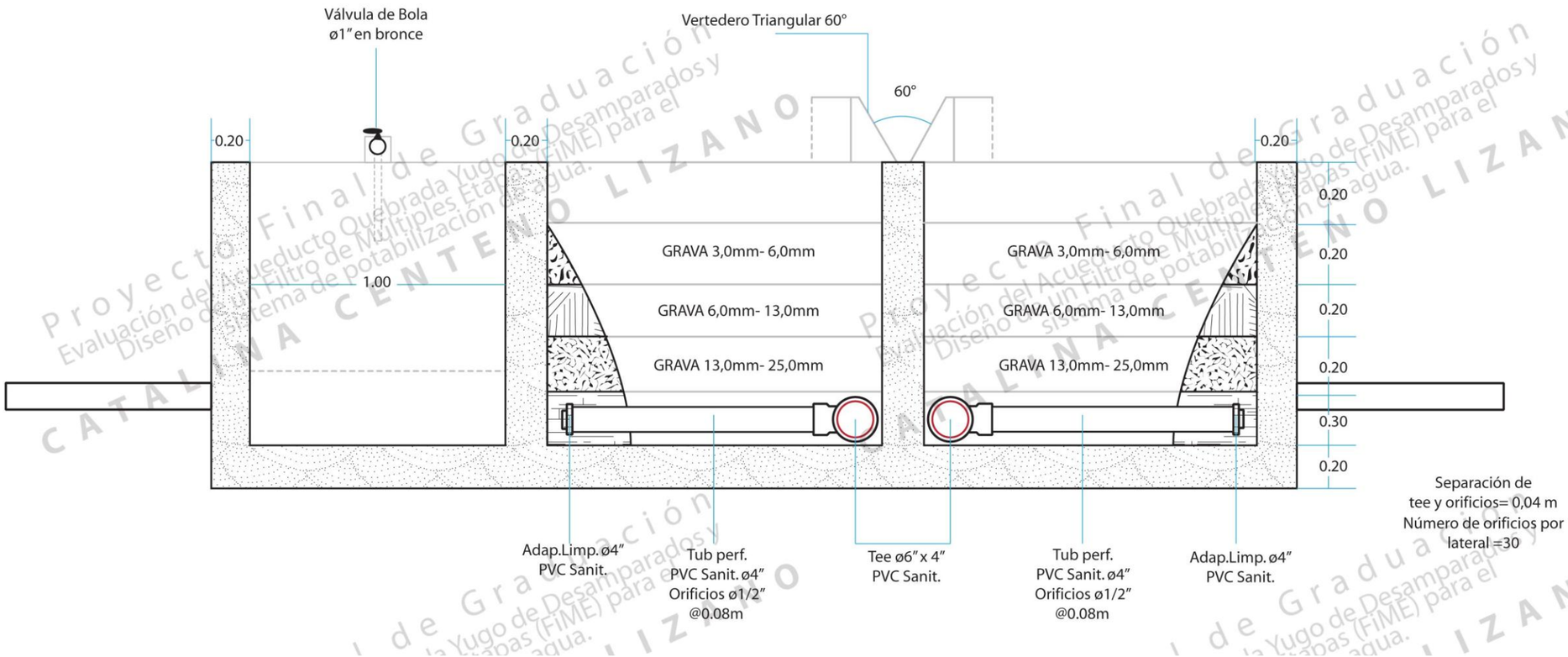


Figura 7.5. Corte C-C` del FGDi diseñado para el acueducto Quebrada Yugo.

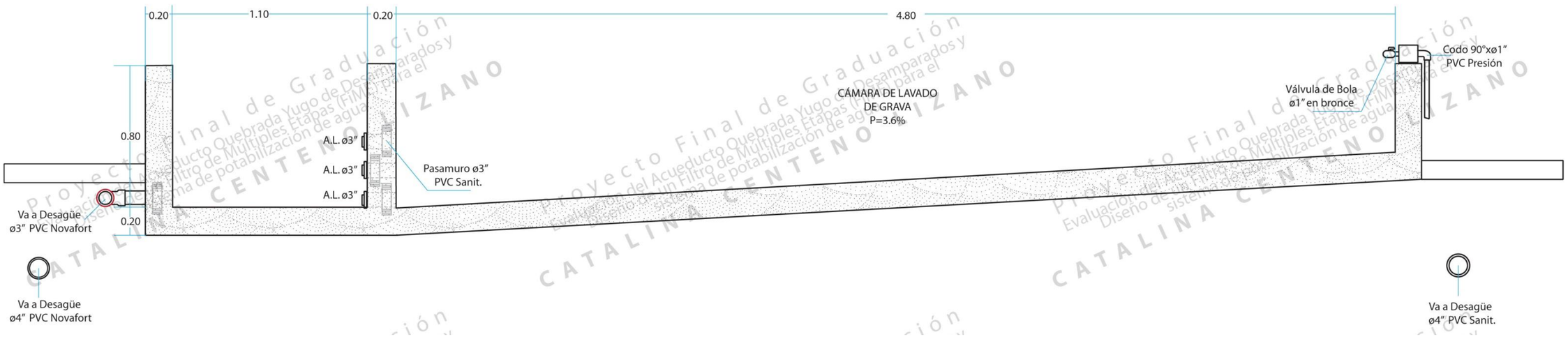


Figura 7.6. Corte D-D` del FGDi diseñado para el acueducto Quebrada Yugo.

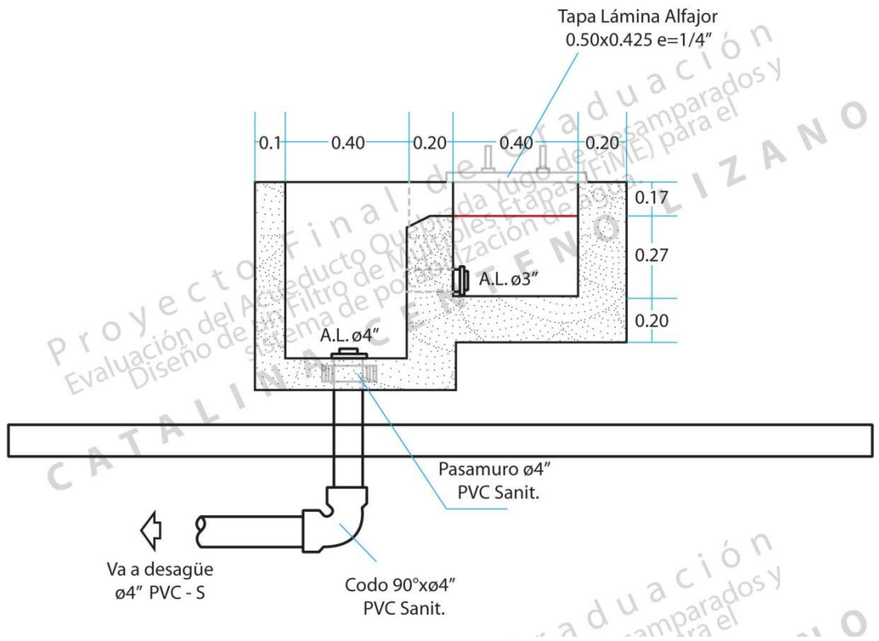


Figura 7.7. Corte E-E` del FGDi diseñado para el acueducto Quebrada Yugo.

CAPÍTULO VIII

CONCLUSIONES

Capítulo VIII
CONCLUSIONES

8. Conclusiones y Resumen de Recomendaciones

El acueducto rural Quebrada Yugo, ubicado en Desamparados cuenta con un sistema de filtración lenta en arena y cloración por electrólisis. Actualmente se están presentando problemas en el mismo, debido a la turbiedad y al arrastre de sólidos provenientes de la quebrada que lo alimenta, provocando que el agua no sea apta para la filtración y comprometiendo el suministro de las comunidades abastecidas por esta planta. Para su solución se resume seguidamente las recomendaciones hechas a lo largo del presente trabajo y se establecen las conclusiones al respecto.

8.1. Obras de Captación

La toma de la quebrada debe ser rediseñada, ya que permite el paso libre a todo el material de arrastre, perjudicando grandemente las tuberías, la función de los desarenadores y de los FLA. Esta debe poseer un muro más alto para aumentar el nivel de agua, que en verano impida la entrada de aire y en invierno permita la sedimentación de materiales, junto con un sistema de lavado y purga de material acumulado. A su vez se debe colocar un sistema de cribado para retener sólidos gruesos, con rejillas inclinadas con el fondo conectado a un sistema de lavado. Mientras que la obra de captación de la naciente, se debe rediseñar de modo que permita colectar adecuadamente el agua y cuente con los elementos básicos de seguridad, operación y mantenimiento.

8.2. Tubería de alimentación a los desarenadores

A parte de estar en un lugar inapropiado, la tubería actual de alimentación a los desarenadores, no cuenta con un apoyo adecuado. El constante movimiento fragmentó la pared a la cual se conectó, y se trató de disminuir colocándole piedras. Sin embargo la fuerza del fluido sigue provocando el movimiento, levantando las piedras, poniendo en peligro la tubería y la estructura. Se debe colocarla en la entrada original de la estructura, con el fin de optimizar el proceso de sedimentación.

8.3. Desarenadores

La falta de rejillas en la captación de la quebrada, deja pasar material de diámetros tan grandes, que las cámaras rápidamente se colman de sólidos. Esto repercute sobre la calidad del efluente, el cual llega a la planta cargado de materiales más finos, por la incapacidad de los desarenadores de retenerlos, debido a la alta afluencia de contaminación, siendo más critica el escenario en invierno. Lo que a su vez trae grandes problemas en la limpieza de las cámaras desarenadoras, ya que la salida se obstruye por la gran cantidad de material, siendo incapaz de utilizarse para el lavado.

8.4. Cámara de entrada de caudal a la planta

Al no existir un canal de entrada se hace inútil el vertedero, pues es imposible medir la carga sobre el mismo. Además el flujo es turbulento impidiendo realizar mediciones, que requieren un flujo laminar. Por lo que es necesario realizar cambios en esta estructura, que permita el control cuantitativo del caudal.

8.5. Colmatación de los FLA

Los porcentajes de colmatación del medio filtrante varían de 50% al 100%, pero no siguen una tendencia, ya que se espera que varíen de manera gradual a través del la profundidad del lecho. Se obtuvo un 100% de colmatación a 8cm y 16 cm de profundidad. Lo cual se evidencia en las cortas carreras de filtración de 25 días en promedio, la rápida pérdida de carga y el porcentaje de remoción de coliformes fecales y otras bacterias de interés en salud pública, como los estreeptococos y pseudomanas. Por lo cual es necesario realizar una limpieza profunda del lecho.

8.6. Cambios en las estructuras de las canaletas de los FLA

Al aumentar el nivel de salida del efluente de los FLA, se incide gravemente sobre carga hidráulica disponible de los filtros, ya que la diferencia entre el nivel del rebose de los FLA y del rebose de su efluente es mucho menor, disminuyendo la carga disponible, lo cual acorta las carreras de filtración.

Asimismo se altera la dinámica hidráulica del proceso, ya que el nivel de agua filtrada supone una mayor presión a la salida del filtro, cuando el principio de funcionamiento del sistema es que la disminución de presión en la base del filtro con respecto a la presión del sobrenadante, impulse el agua a través del filtro, sin embargo ahora se presenta una resistencia al paso del líquido y por ende a la filtración.

8.7. Trampas de arena

La carencia de trampas para la arena y de un recuperador de la misma, en el canal de salida, no solamente es importante por aspectos económicos, sino por la eficiencia del proceso de filtración, ya que al lavar la arena, junto con la suciedad también se eliminan los elementos más finos del estrato, necesarios para retener microorganismos y sólidos muy pequeños.

Construir estas estructuras faltantes eliminaría la pérdida gradual de este insumo, traduciéndose en beneficios económicos a largo plazo, en ahorro de compra de arena y en el mantenimiento de la eficiencia de los FLA.

8.8. Velocidad de filtración

Se encontró que la velocidad de filtración toma valores de hasta los 1,20 m/h. Siendo mayor que lo recomendado. Al aumentar la velocidad de filtración se puede incidir negativamente en el proceso de desinfección que lleva a cabo el FLA. Debido a que se disminuye el tiempo de acción de la población microbiana beneficiosa del schmutzdecke, sobre la población microbiana patógena del agua cruda.

8.9. Carga hidráulica de los FLA

La carga hidráulica disponible es 1,70 m. Sin embargo las unidades operan con el nivel máximo por debajo del correspondiente al de diseño, valor de 1,12m. Esto se debe al estado de colmatación excesiva del medio filtrante que impide el paso del agua a través del lecho, a pocos días de iniciada la carrera.

8.10. Nivel del sobrenadante

Debido a que el lecho presenta actualmente un desnivel hacia la tubería de lavado, la altura del sobrenadante no es constante en cada punto del filtro, siendo de 1,10m en la entrada del caudal y 1,30m en el lado opuesto, con una pendiente del 2%. La inclinación debería estar dada por la pendiente de la estructura y no por variaciones en la altura del lecho. Esto incide sobre el proceso de filtración, ya que la presión que ejerce el sobrenadante, difiera a lo largo del FLA.

8.11. Reconstrucción del lecho filtrante

Es preciso realizar cuanto antes la reconstrucción del lecho del filtro. Los diferentes materiales deben estar dispuestos en capas de modo ordenado y con grosor constante, ya que de lo contrario el proceso de filtración pierde eficiencia, por no desarrollarse uniformemente a través del lecho. El acomodo de las capas es diferente en distintos puntos, provocando que la presión y el momento filtrante sean distintos también. Provoca que el flujo tienda a filtrarse por donde existe menos presión, es decir las áreas donde las capas son más delgadas y se tiene menos arena.

8.12. Niveles de OD

Se realizó un muestreo del OD en diferentes puntos de la planta de potabilización. Los resultados obtenidos se encuentran todos dentro del intervalo recomendado >6 ppm.

8.13. Características del schmutzdecke

Al final de la carrera se pueden observar abundantes hilos verduzcos y gelatinosos que crecen hacia arriba desde la superficie de la arena, debido a la excesiva proliferación de algas filiformes, llegando inclusive a presentarse episodios de blooms. Además se pueden determinar diferentes elementos constitutivos del schmutzdecke a nivel macroscópico, como hojas de árboles, algas e insectos principalmente mariposas y gusanos. Esto está estrechamente relacionado con la calidad del agua, como con el mantenimiento, debido a que no se retiran las impurezas ambientales, las cuales también disminuyen la eficiencia del proceso, por saturación del medio filtrante.

8.14. Carreras de filtración

Los FLA evaluados, presentaron carreras de 25 días en promedio, debido a los efectos del aumento de turbiedad en épocas de lluvias.

8.15. Proceso de desinfección con cloro

La especie desinfectante presente en mayor proporción en la mezcla producida *in situ* es HClO, debido a las condiciones de pH y temperatura. Esto resulta altamente beneficioso pues esta es la especie con mayor capacidad biocida por su tamaño y su neutralidad química, que le permite penetrar las membranas celulares y causar daños a nivel estructural.

Todos los puntos muestreados presentaron una concentración de 0,5 ppm de cloro residual libre, siendo la adecuada para protección del líquido en eventuales sucesos que puedan socavar la integridad de la red de distribución, siempre que éstos se encuentren bajo límites bajos de contaminación, y sean reparados a prontitud.

La ausencia de un salto hidráulico no solo repercute sobre la calidad de la mezcla, sino sobre el proceso de desinfección en sí, ya que no se asegura el contacto del cloro con la totalidad de la masa de agua. La turbulencia es necesaria también para desestabilizar los aglomerados celulares, ya que los microorganismos que se encuentran en el interior pueden quedar inmunes a la acción del biocida. Esto se agrava al tomar en cuenta que el diseño del tanque de cloración da pie a la existencia de cortos circuitos y zonas muertas.

Dadas estas condiciones no se puede asegurar la obtención de una mezcla homogénea en el tanque de cloración, por lo cual se deben realizar cambios en el dosificador y entrada de caudal para que cumplan con las características requeridas.

8.16. Turbiedad

Se realizó un muestreo de los picos de turbiedad que se presentaron durante el periodo de estudio, utilizando el turbidímetro automático de la planta, cuyo límite de cuantificación superior es de 1000,00 UNT.

Se registraron un total de 19 picos, comprendidos entre 573,62 UNT y ≥1000, con un promedio de 895,89 UNT y desviación estándar de 142,11 UNT.

También se llevó a cabo un muestreo de turbiedad entrante a los FLA en los días en que no se presentaba precipitación, obteniéndose un promedio de turbiedad corresponde a 5,22 UNT con desviación estándar de 2,26 UNT.

Se observa un gran contraste entre estos dos promedios. En el periodo lluvioso se sobrepasan los límites aceptados para tratamiento por FiME y mucho más para el sistema de FLA. Siendo el principal problema para el proceso de filtración, por el arrastre de sólidos, al aumentar el caudal de la quebrada.

El muestreo del agua filtrada y del agua del efluente se realizó con el turbidímetro de columna, cuyo límite de cuantificación inferior corresponde a 5 UNT. En ambos casos se obtuvieron siempre valores ≤ 5UNT. Así la eficiencia de remoción de turbiedad para el sistema de potabilización, es ≥50%, bajo los valores normales de turbiedad en el afluente de la planta, correspondiente a ≤10 UNT.

Aún en los picos de turbiedad ≤100 UNT, se obtuvo los mismos resultados de ≤ 5UNT, en los puntos mencionados, siendo este último el valor requerido para un buen desempeño del proceso de cloración. Se obtiene una eficiencia global del sistema de ≥95% bajo picos de turbiedad ≤100 UNT. Concluyéndose entonces que los picos de turbiedad ≤100 UNT no afectan la eficiencia de remoción de este valor. Pero si producen problemas de colmatación prematura en los filtros y reducción de las carreras.

8.17. Eficiencia microbiológica

El proceso de FLA reduce en un 97,9% las bacterias CT y un 94,9% de CF, lo que significa una eficiencia de remoción de 2 log para CT y de 1 log para fecales. Esto tomando el promedio de NMP del afluente de la planta para los cálculos.

Se demuestra que el peso de reducción de la población microbiana recae sobre el tratamiento de filtración, tal y como se requiere que sea en un sistema de potabilización con aguas crudas turbias.

De este modo las operaciones unitarias de filtración lenta y cloración producen en conjunto un 100% de remoción para CT y CF, siendo esta la eficiencia global del sistema de potabilización para estos parámetros. Cumpliendo entonces con lo estipulado en los aspectos microbiológicos del Reglamento para la Calidad del Agua Potable (Decreto Nº 32327-S) que establece como "negativo" el valor requerido para CF, equivalente al límite inferior de cuantificación inferior del método, <1,8 NMP/100ml.

Pseudomonas aeruginosa y *Enterococcus faecalis*, se encontraron presentes en una muestra con cloro residual de 0,2 ppm que fue tomada en conjunto con el muestreo 2 para CT y CF, los cuales dieron negativos a la salida del sistema. Por lo que se recomienda incluir estos indicadores en las pruebas que realiza la ASADA, no solamente a la salida de la planta, sino en los sistemas de distribución. Ya que por su resistencia al secado pueden ser utilizados para realizar controles sistemáticos en las tuberías de distribución, así como para detectar focos de la contaminación.

Asegurar que la calidad del agua potable solamente se rige por los parámetros impuestos por el nivel de control correspondiente en el Reglamento de la Calidad del Agua Potable, es ignorar la importancia cultural, social y comercial del agua, así como su gran repercusión sobre la salud del ser humano, ya sea para su bienestar o detrimento. Esto último debido a que es un vehículo de dispersión de microorganismos patógenos y sustancias tóxicas, que puede llegar a un grande número de personas, pudiendo afectar poblaciones enteras y colocarlas en estado de emergencia.

8.18. Limpieza de superficies internas de las estructuras

Para disminuir la formación de biofilms y crecimiento de musgos sobre las superficies de la entrada de caudal a la planta, los filtros, y las canaletas, se recomienda emparejar las superficies y colocar azulejo con espacio de venilla mínimo. Así se eliminan las rugosidades que favorecen la adherencia de microorganismos y musgos a las superficies.

8.19. Recomendaciones sobre la limpieza de los FLA

Realizar el retiro de material flotante en el sobrenadante, diariamente durante la operación del filtro y antes de drenar el agua. El material flotante debe retirarse con una redecilla como las utilizadas para realizar la limpieza de piscinas, suficientemente larga -3 metros- para que tenga alcance en cualquier punto del filtro.

Prever la limpieza del filtro sin realizar desperdicios de agua. Debido a que el sobrenadante se desagua completamente antes del limpiar el filtro, cuando éste se encuentra colmatado, se desperdician hasta 43m^3 de agua. Si por el contrario se mantiene el proceso de filtración, sin caudal afluente, durante horas antes a la limpieza se aprovechará ese sobrenadante.

No dejar la capa de arena desnuda a merced del sol, debido a que este posee efectos perjudiciales para los microorganismos y activa la proliferación de algas. Ya que los FLA no son techados se debe tener especial cuidado con esto, ya que si se cambian drásticamente las condiciones del ecosistema del lecho, se provocará un desequilibrio, perdiendo gran cantidad de microorganismos beneficiosos. Mientras que por otra parte se propicia el crecimiento excesivo de algas.

Para evitar la incidencia directa de los rayos del sol, se debe realizar la limpieza al iniciar el turno de trabajo procurando retirar la capa biológica antes de las diez de la mañana. Luego de esta hora llenar el filtro de manera ascensional con agua filtrada, a un nivel mínimo de 0,30m, apara que el sol no incida directamente sobre el lecho y continuar la limpieza al siguiente día o en la tarde.

Cuando el filtro no esté en uso, luego de su limpieza, en el periodo en el cual se espera a que finalice la carrera de filtración de su igual, mantener un nivel mínimo de 0,30m de sobrenadante que proteja la capa de arena de los rayos directos del sol, y se mantengan las condiciones húmedas en las que se desarrollan los microorganismos.

Además se recomienda mantener la filtración con una velocidad mucho más baja, y con un afluente menor, que mantenga en equilibrio el sistema. Debido a que dejar el filtro sin funcionar, altera todo el ecosistema y tardará más en llegar a la maduración hasta volver al equilibrio. Sin embargo esto sólo puede ser posible si la capa de arena del filtro se encuentra sin colmatar, ya que de ser así como en el caso de los FLA de la planta, se pondría en peligro la continuidad del sistema. Ya que aún a una tasa de filtración tan baja, el filtro se colmatará rápidamente.

8.20. Problemática relacionada al aumento de turbiedad y soluciones

La problemática causada por el aumento de turbiedad posee diferentes causas, entre ellas el aumento de agua pluvial, el arrastre de sólidos, las condiciones geomorfológicas de la quebrada, deficiencias en el diseño de la captación -especialmente en la quebrada-, y en los desarenadores. Se propone llevar a cabo un estudio de capacidad de suministro y demanda actual. Ya que el número de abonados aumenta, al igual que el consumo, generando áreas sensibles donde el suministro no es totalmente eficiente.

Ya que el caudal de las nacientes depende directamente de la tasa de infiltración, los cambios bruscos en el flujo, como se presentan en la naciente captada actualmente, no permitirían que la planta dependiera exclusivamente de estas fuentes. Sin embargo pueden aminorar la problemática en época lluviosa, que es dónde su caudal aumenta mientras que el de la quebrada baja su calidad. Por esto es necesario llevar a cabo el estudio de las nuevas fuentes de agua subterránea, que se desea incorporar al sistema, junto con la quebrada actual, para determinar cuantitativamente cambios de flujo con respecto a estación seca y lluviosa.

Aún si se llegara a incorporar las nuevas fuentes, es imperativo corregir las deficiencias señaladas en diseño de la captación y de los desarenadores. Porque con ello se lograría disminuir notablemente el arrastre de sólidos dentro del sistema, y conjuntamente los valores de turbiedad.

La FLA es un tratamiento diseñado para operar con su mayor eficiencia a turbiedades ≤ 10 UNT (CEPIS, 2003; Galvis, 1999; Ceabsy et al; Hendricks y Bellamy citados por Galvis, 1999) disminuyendo ésta con valores dentro del rango de 30 a 40 UNT. Los valores picos deben encontrarse entre 50 a 10 UNT, en cuyo caso sólo puede permitirse el paso por un periodo muy corto -un par de horas en uno o dos días- (Galvis, 1999). Debido a que el agua colmatará rápidamente los FLA, se disminuirá su eficiencia y se consumirá toda la carga hidráulica disponible. Como lo demuestran las cortas carreras de filtración que alcanzan los FLA de la planta de Quebrada Yugo.

Por tanto se concluye que de acuerdo a las condiciones actuales de las fuentes de abastecimiento, el tratamiento de FLA no es el idóneo, comprobando la hipótesis establecida. Sin embargo por otra parte estos resultados también permiten concluir que los FLA han desempeñado su función en remoción microbiológica y de turbiedad, aún bajo condiciones inadecuadas del afluente, de operación y mantenimiento. Y a pesar de esto último sigue siendo el tratamiento potabilizador principal del acueducto, confirmándose su eficiencia.

Por las condiciones de la planta de Quebrada Yugo y las ventajas de la FG, se realizó el diseño de un FGDi para planta, para obtener un sistema de FiME. Sin que esto signifique que por sí mismo pueda solucionar los problemas actuales del sistema, se debe primero realizar los cambios señalados. El objetivo del FGDi diseñado será proteger los FLA de los picos de turbiedad hasta 50 UNT, y mejorar su desempeño.

8.21. Cambios en las condiciones laborales del personal

La totalidad de tareas y labores relacionadas con el acueducto, desde mantenimiento, operación, inspección, atención de emergencias, control de calidad, lectura de medidores, corta del servicio, reconexión y hasta llevar comunicados de la ASADA a los consumidores, recae sobre el personal compuesto por dos personas. Por lo cual la labor del personal y sus responsabilidades son excesivas, provocando que se labore más del tiempo establecido por ley y bajo condiciones inapropiadas.

Debido a que solamente el fontanero posee los conocimientos para la administración del sistema, éste no puede estar ausente en ningún momento, por lo cual nunca ha contado con vacaciones.

Es imperativo que la ASADA incluya al menos otra persona capacitada, para poder cubrir los requerimientos del acueducto. Y que se contraten trabajadores para los tareas ocasionales (mantenimiento de zona verde, pintura, construcción, etc).

También se deben realizar cambios para brindar mejores condiciones de trabajo y de ambiente laboral. Entre ellas se encuentra habilitar un espacio para que los trabajadores puedan calentar su almuerzo, prepararse bebidas calientes sumamente importantes debido al frío tan extremo que puede llegar a experimentarse en las instalaciones. También se debe proveer agua potable para su consumo, ya que el agua en el centro de reuniones ubicado en la planta, proviene del caudal entrante al sistema.

8.22. Concienciación de la población abastecida

La población del lugar carece de información sobre la importancia de potabilización del agua y de la situación actual del acueducto, aunado a esto se lleva a cabo un manejo inadecuado del agua, almacenándola en reservorios expuestos a contaminación y vectores de enfermedades. Por lo que es necesaria una labor de educación en la potabilización y manejo del agua, así como de la labor del acueducto, y los costos que esto implica, tomando en cuenta que el ser un acueducto rural le confiere características únicas, en cuanto a los aspectos económicos, sociales y culturales de la zona. La asociación comunal encargada del manejo de la planta también requiere de capacitación al respecto para mejorar la calidad del agua, manejo de los costos por medio de un estudio tarifario, así como una evaluación de la misma asociación, que señale los potenciales de mejora.

8.23. Programas de protección de fuentes

Es importante contar con programas de protección del sistema, entre ellos, programa de seguridad del agua, programa de protección y reforestación de fuentes. Para los cuales es necesario contar con el apoyo de instituciones académicas, gubernamentales u ONG, que posean el conocimiento y la capacidad de trasmitirlo.

Bibliografía

Adams, M. (2010). *Mechanisms of microbial reduction and implications for Design and operation of the biosand water filter*. United States of America, Chapel Hill: UMI, Dissertation Publishing.

Arias, A. (2010). *Situación de Potabilización y Saneamiento en Costa Rica. Ponencia preparada para el Decimosexto Informe Estado de la Nación*. San José, Costa Rica: Programa Estado de la Nación.

Cánepa, L. (2004). *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida, Manual I.* Lima: CEPIS.

Centro Internacional en Agua y Saneamiento IRC. (n.d.) *Filtración en Múltiples Etapas, FiME, tecnología innovadora para la humanidad*. Obtenida el 1 de agosto de 2010, de http://www.es.irc.nl/page/34315.

CEPIS. (1992). *Tratamiento filtración lenta*. Lima: CEPIS. (Ciclo serie tratamiento filtración lenta). Manual I: teoría y evaluación; Manual II: Diseño; Manual III: Operación, mantenimiento y control.

CEPIS, OPS, OMS. (2001). *Guía de campo para el inspector Para ser usada en la inspección de pequeños sistemas de aguas superficiales*. Lima, Perú.

Chanson, H. (2002). *Hidráulica del flujo en canales abiertos*. Colombia: McGraw-Hill. Costa Rica. Poder Ejecutivo. (5 de febrero, 1996). *Ley Forestal No. 7575*. San José, Costa Rica.

Ente Nacional De Obras Hídricas De Saneamiento (EnoHSa). (2007) *Filtración Lenta*. Argentina: Universidad Tecnológica Nacional.

Galvis, A; Vargas, V. (n.d.) *Modelo de selección de tecnología en el tratamiento de agua para consumo humano*. Obtenida el 7 de julio de 2010, de http://www.alfa-editores.com/alimentaria/Sept%20-%20oct%2005/TECNOLOGIA%20Modelo.htm.

Galvis, G. (1999) *Development And Evaluation Of Multistage Filtration Plants; An Innovative, Robust And Efficient Water Treatment Technology*. United Kingdom: University of Surrey.

García, J., Cortés, J., Córdova, M. (27 al 31 de octubre, 2002). *Evaluación de compuestos desinfectantes en la eliminación de Vibrio Cholerae y Escherichia Coli presentes en agua*. Cancún, México: XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.

Geldreich, E. Craun, G. (1996). *Barreras múltiples para la protección y el tratamiento del abastecimiento de agua potable: un método probado de prevención de la propagación de las enfermedades transmitidas por el agua. La calidad del Agua Potable en América Latina. Ponderación de los Riesgos Microbiológicos contra los Riesgos de los Subproductos de la Desinfección Química. ILSI Argentina*. Washington, D.C.: OPS, OMS, ILSI Press.

GLI International, Inc. (n.d.) *Steady Stream 4 High-range Turbidimeter System Manual. Model T53 Analyzer and 8324 Sensor. Rev. 3-300*. Obtenida el 8 de abril de 2010, de www.hach.com.

Glynn, H., Gary, H. (1999). *Ingeniería Ambiental*. México: Prentice Hall. (2ª Ed). 800p.

Gyles, E.C. (2009). *Assessing the role of protists in removing E. coli in slow sand Filters*. United States of America, New Hampshire: UMI, Dissertation Publishing.

Instituto meteorológico nacional (IMN). (n.d.). *Clima*. Obtenida el 20 de marzo de 2010, de www.imn.ac.cr/education/clima%20de%20costa%20rica.html.

Kumar, P. (2004). *Performance evaluation of fabric aided slow sand filter*. Windsor, Ontario, Canada: Heritage Branch.

López, L., Monier, F., Labrada, B. (2005). *Estudio de la obtención electrolítica "in situ" de disoluciones acuosas de hipoclorito de sodio*. Universidad de Oriente. Tecnología Química, Vol 25, No 2.

Masís, J. T. (n.d.). *Mezclas oxidantes generadas in situ.* Miami, EUA: Pres. Equipment & System Engineering, Inc.

Mora, D., Portuguez, F. (Marzo, 2003) *Situación de Cobertura y Calidad del Agua para Consumo Humano en Costa Rica al año 2002*. Costa Rica: LNA, AyA.

Mott, R. (1996). *Mecánica de Fluidos aplicada*. México: Prentice Hall Hispanoamericana, S.A. (4ta. Ed.)

OMS, UNICEF. (2010). *Progresos en materia de saneamiento y agua potable. Informe de actualización 2010. Programa Conjunto OMS/UNICEF de Monitoreo del Abastecimiento de Agua y el Saneamiento.* Obtenida el 7 de junio del 2010, de http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2010/water_20100315/es/index.html

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2006). *Guías para la calidad del agua potable: incluye el primer apéndice.* (3ra Ed.) Vol. 1: Recomendaciones.

Organización Panamericana de la Salud OPS. (2000). *Tecnologías Apropiadas en Agua Potable y Saneamiento Básico. Health Library for Disasters*. Obtenida el 7 de setiembre de 2010, de http://helid.digicollection.org/en/d/Jwho91s/2.4.8.html.

Organización Panamericana de la Salud (OPS). (1999). *La desinfección del agua*. Oficina sanitaria Panamericana, Oficina Regional para las Américas.

Organización Panamericana de la Salud (OPS). (2003). *Calidad del agua potable en Costa Rica: Situación actual y perspectivas*. San José, Costa Rica: Organización Panamericana de la Salud, Ministerio de Salud. 40p. (Serie Análisis de Situación de Salud; no. 13)

Organización Panamericana de la Salud (OPS), Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). (2005). *Guía Para Diseño De Sistemas De Tratamiento De Filtración En Múltiples Etapas*. Lima: OPS-CEPIS.

Otterstetter, H. Zepeda, F. (1996). *Ponderación de los riesgos microbianos y químicos en la desinfección del agua potable: la perspectiva de la Organización Panamericana de la Salud. La calidad del Agua Potable en América Latina. Ponderación de los Riesgos Microbiológicos contra los Riesgos de los Subproductos de la Desinfección Química. ILSI Argentina, OPS, OMS.* Washington, D.C.: ILSI Press.

Pajares, M., Orlando, E. (2002). *Microorganismos indicadores de la calidad del agua de consumo humano en Lima Metropolitana*. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Facultad de Ciencias Biológicas. EAP. de Ciencias Biológicas.

Pardón, M; Flores, L; González, A y Martín, A. (2003). *Filtración en Múltiples Etapas para abastecimiento de agua en sistemas municipales del Estado de Morelos-México.* México: Subcoordinación de Potabilización, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua ITMA.

Ramirez, F. (1996). *Evaluación hidráulica – sanitaria de la planta de potabilización de Guadalupe.* Costa Rica: Universidad de Costa Rica: Facultad de Ingeniería Civil.

Reid, R. (n.d.). *Situación de la desinfección del agua en América Latina y el Caribe.* Washington D.C., EUA: OPS, OMS.

Reiff, F. (1996). *La calidad del Agua Potable en América Latina. Ponderación de los Riesgos Microbiológicos contra los Riesgos de los Subproductos de la Desinfección Química. ILSI Argentina, OPS, OMS.* Washington, D.C.: ILSI Press.

Rojas, R., Guevara, S. (2000). *Estabilidad de la solución de hipoclorito de sodio producido in situ.* Lima, Perú: Agencia Suiza para el desarrollo y la cooperación (COSUDE), OPS, OMS, CEPIS.

Sánchez, L., Sánchez, A., Galvis, G y Latorre, J. (2007). *Filtración en Múltiples Etapas. Documento de Revisión Técnica 15.* Colombia: IRC-Univalle-Cinara.

Snowden-Swan, L., Piatt, J., Lesperance, A. (July 2008). *Disinfection Technologies for Potable Water and Wastewater Treatment: Alternatives to Chlorine Gas.* United States of America: U.S. Army Forces Command, Air Quality Division.

Unger, M. C. (2006). *The role of the schmutzdecke in E. coli removal in slow sand and riverbank filtration*. United States of America, New Hampshire: UMI.

Vargas, R. G. (1993). *Evaluación Hidráulica y Sanitaria de la Planta Potabilizadora de Cartago. Informe de proyecto Final para Graduación*. Costa Rica: Universidad de Costa Rica, Facultad de Ingeniería Civil.

Villanuevaa C., Kogevinasa, M., Grimaltb J. (2001).*Cloración del agua potable en España y cáncer de vejiga*. España: Institut Municipal d'Investigació Mèdica (IMIM). Unitat de Recerca Respiratòria i Ambiental. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Instituto de Investigaciones Químicas y Ambientales de Barcelona. Departamento de Química Ambiental.

Villón, M. (1985). *Hidráulica de canales*. Cartago, Costa Rica: Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Witt, V., Reiff, F. (1996). *Tecnologías de la desinfección del agua para comunidades pequeñas y zonas rurales. La calidad del Agua Potable en América Latina. Ponderación de los Riesgos Microbiológicos contra los Riesgos de los Subproductos de la Desinfección Química. ILSI Argentina, OPS, OMS.* Washington, D.C.: ILSI Press.

Anexo 1

Filtros gruesos

Los filtros gruesos han sido diseñados para producir un efluente con turbiedad menor de 10 a 20 UNT, o con menos de 5 mg/l de sólidos suspendidos para facilitar el proceso de tratamiento en las unidades de FLA e incrementar el tiempo de operación de esas unidades de tratamiento.

Algunas de las finalidades de los FG son (EnoHSa, 2007):

a. Reducir la turbiedad, los sólidos suspendidos y el número de coliformes fecales, como tratamiento preliminar de la filtración lenta de arena.
b. Producir agua potable en zonas donde la calidad del agua cruda hace posible el diseño de filtración lenta de arena solamente.
c. Ser considerados como una alternativa en una evaluación sobre diversos procesos de tratamiento del agua cruda disponible, desde el punto de vista técnico, económico y operativo.
d. La calidad del agua superficial contaminada puede ser mejorada sustancialmente cuando se filtra a través de mantos de grava y arena, generalmente utilizados como material filtrante.

Existen diferentes tipos de FG, los cuales se clasifican de acuerdo al propósito principal de su aplicación y a la dirección del flujo. Se incluyen FGDi, FGDS, FGAS, FGAC y FGH.

En el cuadro A.1.1 se presentan los costos estimados en dólares americanos para los diferentes tipos de de filtros.

Cuadro A.1.1. Costos directos de construcción estimados (miles de USD) (Pardón, M. et. al, 2003).

	2 L/s		14 L/s		25 L/s	
	Concreto	Tabique	Concreto	Tabique	Concreto	Tabique
FGDi	4	3.4	12	10	17	14
FGAC	4.9	3.8	23	19	32	29
FGAS2	9.1	7.1	43	34	61	53
FGAS3	13	10.5	62	53	91	80
FLA	20	18	90	80	130	120
FGDi+FLA	33	32	120	115	170	160
FGDI+FGAC+FLA	40	35	150	140	200	180
FGDi+FGAS2+FLA	44	38	170	160	230	205
FGDi+FGAS3+FLA	49	43	185	175	260	230

FGDi Filtro Grueso Dinámico
FGAC Filtro Grueso Ascendente en capas
FGAS2 Filtro Grueso Ascendente en serie - 2 etapas
FGAS3 Filtro Grueso Ascendente en serie - 3 etapas
FLA Filtro Lento en Arena

El FGDi consiste de dos o más unidades en paralelo compuestas de tres capas de grava de diferente tamaño, desde gruesa en la parte inferior hasta fina en la superficie (Figura A.1.1). El agua se filtra a través del lecho de grava desde la superficie hasta el fondo, alcanzando el sistema de drenaje, desde el cual fluye a la siguiente unidad de tratamiento. (Galvis, G. 1999)

Ya que la grava usada es relativamente gruesa, la pérdida de carga sobre el lecho de filtración es muy pequeña (en promedio 0.01m). En la superficie opuesta a la zona de entrada hay un vertedero de salida de cresta delgada con una altura entre 0.03 y 0.05 m sobre el lecho de grava. Se ha reportado una reducción del 23 al 77% en sólidos suspendidos en las unidades de FGDi, procesando agua cruda con sólidos suspendidos entre 7.7 – 928 mg/l y operando a velocidades de filtración entre 1 y 9 m/h. Si se desea proteger a la planta de tratamiento de picos de turbiedad o sólidos suspendidos, entonces, mayores tasas de filtración pueden ser aplicadas. (Galvis, G. 1999)

Figura A.1.1. Esquema de un Filtro Grueso Dinámico. (Sánchez, L. et al, 2007)

Figura A.1.2. Esquema de un Filtro Grueso Descendente en Serie. (Sánchez, L. et al, 2007)

Los sistemas de FGDS consisten usualmente en tres compartimentos hidráulicamente independientes pero que trabajan en serie, todos con el mismo rango de filtración (Figura A.1.2). Sin embargo por las limitaciones estructurales y de limpieza, estos filtros poseen una pequeña cama filtradora en cada compartimiento, usualmente menor a 1,5m y la altura total de cada compartimiento filtrante no llega a alcanzar 2m, incluyendo el soporte y el drenaje.

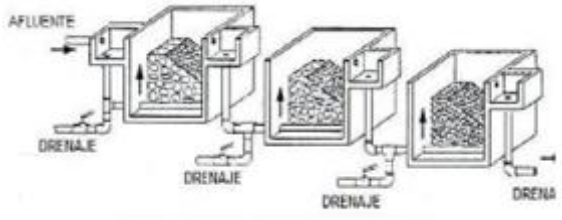


Figura A.1.3. Esquema de un Filtro Grueso Ascendente en Serie. (Sánchez, L. et al, 2007)

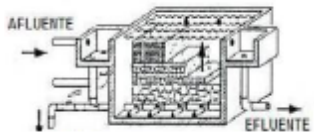


Figura A.1.4. Esquema de un Filtro Grueso Ascendente en Capas. (Sánchez, L. et al, 2007)

En un Filtro grueso ascendente el agua pasa a través del lecho de grava de abajo hacia arriba. Las impurezas son retenidas por el filtro. La filtración de flujo ascendente tiene la ventaja que las partículas más pesadas son removidas primero en el fondo del filtro.

Para hacer la limpieza solamente se abre una válvula de desagüe de apertura rápida, lo que permite el drenaje por acción de la gravedad. (Galvis, G. 1999)

Existen dos tipos de filtros gruesos ascendentes. En la FGAC, la grava está ubicada en capas con diferentes tamaños del grano, variando desde gruesos en el fondo a finos en la superficie (Figura A.1.4). El otro tipo la FGAS, es usado para aguas más contaminadas (Figura A.1.3). Este sistema consta de dos o tres unidades con diferentes tamaños de grava, en cada unidad se empacan diversos tamaños de grava, comenzando con granos gruesos en la primera etapa hasta finos en la última. (Galvis, G. 1999)

Para el lecho filtrante de los FGA se recomienda la granulometría y espesor de capas dadas en el siguiente cuadro.

Cuadro A.1.2. Granulometría y Espesor De Capas para FGA. (OPS-CEPIS, 2005).

Lecho Filtrante (mm)	Altura (m)					
	FGAC	FGAS 2		FGAS 3		
		1	2	1	2	3
19 - 25	0.30*	0.30*		0.30*	0.20*	
13 - 19	0.20 - 0.30	0.30 - 0.45	0.20*	0.15	0.15*	0.15*
6 - 13	0.15 - 0.20	0.30 - 0.45	0.15*	0.45 - 0.75	0.15*	0.15*
3 - 6	0.15 - 0.20		0.30 - 0.45		0.40 - 0.70	0.15*
1.6 – 3	0.10 - 0.20		0.25 - 0.40			0.45 - 0.75
Total (m):						
• **Soporte**	0.30	0.30	0.35	0.30	0.50	0.45
• **Lecho Filt.**	0.60 - 0.90	0.60 - 0.90	0.55 - 0.85	0.60 - 0.90	0.40 - 0.70	0.45 - 0.75

* Lecho de soporte

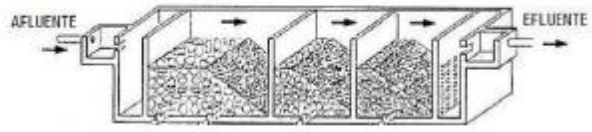


Figura A.1.5. Esquema de un Filtro Grueso de flujo Horizontal. (Sánchez, L. et al, 2007)

En los FGH el agua corre en dirección horizontal -como su nombre lo indica- a través del lecho de grava, el cual decrece en tamaño (Figura A.1.5). El área filtrante se divide en tres o cuatro secciones cada vez más estrechas, y se coloca grava gruesa en la primera sección hasta llegar a fina en la última. La ventaja de este sistema es que las capas de grava se pueden ampliar sin necesidad de una gran estructura (alrededor de 1 a 1,5m). (Galvis, G. 1999)

En general los FGH son más eficientes que los sedimentadores por la gran superficie específica disponible en la grava. Cuando opera con carreras largas, no sólo remueve partículas inertes, sino también microorganismos.

Las carreras se pueden alargar mediante descargas hidráulicas y el lavado de la grava se puede distanciar. Es posible lograr una periodicidad de dos a tres años, dependiendo de la turbiedad máxima del afluente.

Dentro de las restricciones de los FGH se encuentran las profundidades mayores de 1.5 m y anchos mayores de 5.0 m que dificultan la limpieza de la unidad. En general, se recomiendan profundidades no mayores de 1.0 m y anchos máximos de 4.0 m. Estas recomendaciones restringen el uso de estas unidades a caudales pequeños; la otra alternativa es considerar muchas unidades en paralelo. Las turbiedades mayores de 300 UNT demandan unidades de 8 a 16 m de largo. (Galvis, G. 1999)

Dada la cantidad de FG, existen diferentes combinaciones de tratamiento FiME. El diseño de la combinación adecuada requiere de un estudio certero de las características del agua cruda a tratar, donde los parámetros principales son, color, cantidad de coliformes fecales y turbiedad.

Anexo 2

Tipos de desinfección y microorganismos indicadores

Tipos de desinfección

a. Desinfección por luz ultravioleta

La luz ultravioleta inactiva los microorganismos, al provocar mutación, por lo que éstos no pueden reproducirse, ni ejercer su efecto nocivo. Comprende la luz con longitudes de onda entre 240 y 280nm, sin embargo es más eficaz a 260nm (Witt, V., Reiff, F. 1996).

En un sistema de radiación ultravioleta, el flujo de agua pasa a través de lámparas ultravioletas exponiendo los microorganismos a esta energía. Esta exposición modifica el ADN de los agentes patógenos. Este método presenta la ventaja de no necesitar adición de sustancias químicas, aparte de no generar subproductos. De igual forma no necesita procesos de decloración, y las medidas de seguridad son reducidas enormemente. Esta desinfección es más efectiva que la cloración, en cuanto a inactivación de virus y esporas, además de requerir tiempos de muy cortos (Snowden-Swan, L., et. al. 2008).

Factores como la turbiedad, los sólidos suspendidos o disueltos y el color del agua afectan negativamente la absorción. La temperatura del agua influye en la operación de la lámpara, no así en la desinfección (Witt, V., Reiff, F. 1996).

En promedio se necesita una exposición de 30 000 $\mu w.s/cm^2$, para desinfectar el agua, pero cuando están presentes microorganismos persistentes, se requiere hasta 100 000 $\mu w.s/cm^2$ (Witt, V., Reiff, F. 1996).

La luz ultravioleta no posee un efecto residual, por lo que no es apropiada para redes de distribución extensos. Asimismo, es necesario prestar atención a la dosis letal de luz aplicada a los microorganismos, de otra manera, podría ocurrir una reinfección (Snowden-Swan, L., et. al. 2008).

Como la eficacia de la radiación UV es dudosa contra quistes de protozoarios patógenos y huevos de áscaris, se necesita que la mayor parte de las aguas superficiales sean objeto de floculación química, sedimentación y filtración antes de su desinfección con este tipo de luz. La desinfección con luz UV suele ser más costosa que los métodos convencionales (Witt, V., Reiff, F. 1996).

b. Desinfección por químicos:

b.1. Ozono

El ozono (O_3) posee un alto potencial de oxidación, tanto hacia materia orgánica como inorgánica, por lo que constituye el biocida más efectivo además de presentar otras ventajas.
El O_3 posee un efecto letal sobre microorganismos resistentes al cloro. No genera sabores ni olores (Henry, Heinke. 1999). Algunas veces el ozono se combina con peróxido de hidrógeno o luz ultravioleta para mejorar el efecto oxidante, aplicado en un esfuerzo multipropósito para alcanzar una desinfección que logra destruir sabores y olores derivados de algas (Snowden-Swan, L., et. al. 2008).

Los tiempos de contacto y las cantidades necesarias son menores que otros métodos (Witt, V., Reiff, F. 1996). Dependiendo del tipo de agua y sus propiedades biológicas, se mantendrán ámbitos de concentración entre 0,2 y 0,4mg/l, y valores alrededor de 2mg/l para microorganismos más resistentes. La eficiencia de la desinfección varía de acuerdo con factores como temperatura y pH. Para asegurar una correcta desinfección se requiere que el ozono reaccione de forma completa con todos los componentes del agua (Witt, V., Reiff, F. 1996).

Con la ozonación es posible la degradación de sustancias orgánicas sintéticas, el tratamiento de fenoles y la obtención de una mejor eficacia en la floculación (Witt, V., Reiff, F. 1996). De igual manera, reduce metales disueltos y ataca los THM.

Este método presenta varias desventajas. El transporte se dificulta debido a su inestabilidad, por tanto no puede envasarse ni almacenarse, es necesaria la generación in-situ y su inmediata utilización (Witt, V., Reiff, F. 1996). Debido a su carente efecto residual, se emplean tratamientos secundarios seguidos a la ozonación, para evitar el riesgo de una posible contaminación o una reaparición de microorganismos (Witt, V., Reiff, F. 1996). Además, presenta un elevado costo. Por esto último, su uso en América Latina no es muy popular, no así en Europa donde es más común utilizarlo (Henry, Heinke. 1999).

En el agua, el ozono se desintegra rápidamente, y genera compuestos menos complejos, los cuales son mejor asimilados por microorganismos. De aquí, la necesidad de un tratamiento de desinfección posterior. Por otro lado, su manipulación deber ser bastante cuidadosa debido a su alta toxicidad, esto desencadena dificultades de operación y mantenimiento. Aparte de esto, es altamente corrosivo.

Debe evitarse su aplicación en aguas con bromuro, puesto que puede formar bromatos y bromoformos. Comparado con los subproductos de la cloración, la ozonificación posee el efecto oxidante más amigable con la salud humana (Witt, V., Reiff, F. 1996).

La implementación de esta desinfección cobra más factibilidad en proyectos pequeños o en aguas con alta contaminación (Witt, V., Reiff, F. 1996).

b.2. Yodo

Este halógeno es el único en estado sólido a temperatura ambiente y presión normal, su solubilidad es la menor de los halógenos. Su potencial de oxidación es muy bajo, y entre el cloro, el bromo y el yodo, es el que menos hidroliza (Witt, V., Reiff, F. 1996).

Por poseer una baja solubilidad, su aplicación en sistemas grandes de abastecimientos de agua podría crear dificultades. No obstante, esta propiedad brinda ventajas en sistemas pequeños pues permite evitar sobredosis excesivas. Su uso no se ha generalizado en sistemas públicos de abastecimiento, principalmente por su alto costo, casi diez veces el del cloro. Además del estrecho margen de seguridad entre la dosificación necesaria para lograr una desinfección adecuada y el umbral protector de las personas sensibles al yodo (Witt, V., Reiff, F. 1996).

Se ha considerado, según Chang (citado por Witt, V., Reiff, F. 1996), que por la ausencia de carga eléctrica, el yodo molecular (I_2) representa un mejor cisticida y esporicida que el cloro. Esto es debido a que puede difundirse mejor a través de las paredes de las células. En condiciones adecuadas, la eficacia bactericida del yodo es dos veces mayor que la cloración. Investigaciones han comprobado que para aguas con alto pH a 20ºC, la dosificación requerida es menor a 1mg/l, con lo que se consigue una inactivación del 99, 9%. Sin embargo una de sus desventajas es la carencia de efecto residual.

Cabe mencionar que el yodo se convierte en un virucida más eficaz con un aumento del pH. Cuando el yodo y el cloro se emplean conjuntamente, son capaces de atravesar los revestimientos protectores que producen las bacterias en las paredes de las tuberías (Witt, V., Reiff, F. 1996).

b.3. Cloro

Este desinfectante constituye el de mayor uso en Costa Rica, por las ventajas que presenta, como lo constituyen el ser eficaz, de bajo costo, elimina sabor y olores, posee efecto residual, de dosificación flexible y oxida especies químicas. Es por esta razón que se tratará con más detalle.

El AyA empieza a utilizar el cloro como desinfectante en agua, en los años 60`s, y actualmente forma parte de la etapa final de tratamiento indispensable, como barrera de seguridad, en las plantas de dicha institución, para garantizar la desinfección adecuada del agua. Su amplio uso se da principalmente por su bajo costo (Witt, Reiff. 1996).

Una de las desventajas de la cloración, reside en su alta toxicidad. Por lo que debe manejarse con suma cautela, y tener pleno conocimiento de sus propiedades y riesgos. Así como contar con un protocolo a seguir en caso de fugas de gas cloro, debido a su fácil y rápida dispersión en el aire, por lo puede afectar en un radio importante alrededor del foco de emisión. Lo anterior cobra mayor importancia en zonas pobladas. También debe tomarse en cuenta que el cloro es altamente corrosivo, por lo que es necesario proteger los sistemas de distribución contra su acción.

Aplicado correctamente el cloro destruye patógenos, inactiva organismos molestos, oxida hierro, manganeso, nitratos y sulfatos, además una de sus ventajas indiscutibles, consiste en su efecto residual. Sin embargo la cloración por sí misma no asegura la eficiencia de remoción de patógenos y características indeseables en el agua, sino que se deben asegurar las condiciones requeridas para que su efecto sea positivo y no adverso.

La cloración también es utilizada para eliminar el sabor y olor de las aguas. Para esto se debe añadir mayor cantidad de cloro y realizar diferentes pruebas de modo que se eliminen estas características organolépticas, sin que se exceda la dosis de cloro, debido a que esto pude añadir un sabor no deseado y molesto al agua (Henry, Heinke. 1999).

La demanda de cloro refiere a la cantidad de este químico necesaria para reaccionar con los componentes inorgánicos del agua, como hierro, magnesio, nitratos y amoniaco, así como para tratar las impurezas orgánicas. La cantidad de cloro que permanece después de la reacción con esos compuestos, se conoce como cloro libre disponible o como cloro residual (Henry, Heinke. 1999).

Al aplicar el cloro se pueden presentar dos tipos de efecto residual, la cloración residual combinada, y la cloración residual libre. La primera consiste en la formación de cloraminas debido a la adición de cloro. La cloración residual libre, es producto de la reacción de este elemento con el agua, que forma ácido hipocloroso HOCl, el cual a su vez produce iones hipoclorito OCl^-. De estos, el HOCl constituye el principal desinfectante, por reacciones de sustitución (Henry, Heinke. 1999). Los átomos de oxígeno libre también coadyuvan a la acción biocida, por su poder de oxidación.

Debido al tamaño molecular del ácido hipocloroso, y su neutralidad eléctrica, esta especie entra fácilmente a la célula, a través de su pared celular que se encuentra cargada negativamente. Causa alteraciones físicas, químicas y bioquímicas en la pared de la célula, por medio del intercambio de átomos con otros compuestos, oxidando las proteínas estructurales, y de este modo, y así elimina los microorganismos.

Las cloraminas poseen un poder desinfectante menor que el HOCl, sin embargo, su importancia estriba en la persistencia que presentan en el agua. Por esta razón, estos compuestos son considerados como desinfectantes secundarios (Witt, Reiff. 1996). Para obtenerlas, se agrega amoniaco al agua ya clorada (Henry, Heinke. 1999). La adición del amoniaco representa una operación adicional que puede incrementar el costo de la desinfección, lo que vuelve más complejo el proceso (Witt, Reiff. 1996).

Aplicar y mantener cloro residual en un sistema de distribución ofrece beneficios protectores ante el detrimento del agua suministrada debido a contaminación orgánica. Es importante mantener un desinfectante residual de al menos 0, 1mg/l de cloro. Cuando no se cumple con este residual, puede deberse a una excesiva acumulación de sedimentos e incrustaciones en el interior de las tuberías (Geldreich, E. Craun, G. 1996).

Con cloro libre y residuales superiores a 0,2mg/l, pueden inactivarse efectivamente las bacterias patógenas y los virus introducidos en la red. El grado de efectividad guarda relación con la temperatura del agua, el tiempo de contacto para generar la acción desinfectante y la demanda de desinfectante requerida para la contaminación presente, como se verá más adelante. Con entradas masivas de aguas residuales, el desinfectante residual no proporcionará una protección absoluta. Afortunadamente, el efecto inmediato de la dilución del contaminante en agua de gran calidad reduce considerablemente las concentraciones de sustancia orgánica, turbiedad y microorganismos. Sin embargo, la efectiva vigilancia del cloro residual en precisión de que desaparezca, puede alertar de inmediato contra la contaminación (Geldreich, E. Craun, G. 1996).

En Costa Rica se procura dosificar cloro de manera que se obtenga un residual entre 0, 5 y 1mg/l. Esto se debe a los materiales constituyentes del sistema de tuberías de los acueductos, los cuales consumen mayor cantidad de cloro. Ello se evidencia en los desprendimientos de material -ocasionados por su antigüedad y mal mantenimiento- provenientes de las tuberías, posibles infiltraciones a lo largo de éstas y contaminación cruzada.
Una cloración eficaz depende de la dosificación aplicada. Esta debe ser suficiente para satisfacer la demandad de cloro y para obtener los valores de residual, necesarias para una óptima desinfección.

Para lograr una correcta dosificación es necesario realizar pruebas para determinar la cantidad apropiada. Para esto, debe medirse la concentración de cloro en la salida de la planta de tratamiento y en su destino final, el punto más alejado de la planta de tratamiento. Es conveniente esperar como mínimo media hora entre la aplicación y la medición de la concentración residual (OPS, 1999).

También debe tomarse en cuenta, que la reacción producida por el cloro se encuentra influenciada por factores como pH, temperatura y cantidad de materia orgánica.

Las temperaturas óptimas para la reacción van desde los 16 ºC hasta los 40ºC. Mientras que los pH óptimos se encuentran alrededor de 6. En aguas muy frías o muy calientes, la reacción no ocurre.

Otra desventaja radica en la formación de productos tóxicos y cancerígenos, como resultado de la reacción del cloro con la materia orgánica presente en el agua. Estos compuestos son denominados trihalometanos THM, el más importante es el cloroformo. Por esto es imprescindible el tratamiento previo del agua, para eliminar las sustancias orgánicas, y disminuir así el riesgo de generar estos compuestos.

b.3.1 Formas de cloro

Existen diferentes formas de cloro en las que se encuentra el cloro, que puede ser utilizado para desinfección de agua, entre ellas se encuentra:

- Cloro gaseoso, Cl_2.
- Hipoclorito de Calcio $Ca(ClO)_2$ en forma sólida,
- Cloruro de sodio $NaCl_2$ (sal común) con electrólisis.
- Hipoclorito de sodio NaClO, en forma sólida.
- Dióxido de cloro ClO_2.
- Cloraminas.

No todas las formas del cloro, ni todas las reacciones producidas con el agua, son igualmente efectivas. El más usado de forma óptima para desinfección, es la gaseosa, pues es el más efectivo. Este se almacena en forma líquida en tanques de acero. Para añadirlo al agua tratada, se disuelve en agua al vacío debido a su toxicidad (OPS, 1999).

b.3.2. Comportamiento del cloro en el agua

Al introducir el cloro en el agua, se irán produciendo sucesivamente diversas reacciones químicas, que determinarán la curva del comportamiento de este. (Rodríguez, M. [et al.], 2007) La primera reacción ocurre entre el cloro y el agua, por hidrólisis reversible, para formar ácido hipocloroso y ácido clorhídrico, productos llamados cloro activo libre.

La reacción es como sigue:

$$Cl_2 + 2\ H_2O \leftrightarrows HOCl + H^+ + Cl^- \quad \text{(ec. 1)}$$

El ácido hipocloroso se disocia en iones hidrógeno e iones hipoclorito:

$$HOCl + H_2O \leftrightarrows H^+ + OCl^- \quad \text{(ec. 2)}$$

Si el agua contiene amoniaco -un compuesto muy común en ella-, o aminas orgánicas, se formarán mono (NH2Cl) y dicloraminas (NHCl2). Si la cantidad de cloro presente es suficiente, este trasformará la totalidad de amoniaco en monocloraminas (ec. 1) y éstas a su vez en dicloroaminas (ec.2), muy inestables, por lo que se descomponen en sus elementos constitutivos (ec.3). Si aún en el agua el cloro está disponible, se formarán tricloroaminas (NCl_3) compuestos molestos por su sabor amargo (ec.4). Las reacciones son las siguientes:

$$NH_4^+ + HOCl \leftrightarrows NH_3 + Cl^- + H_2O \quad \text{(ec. 3)}$$

$$NH_3{}^+ HOCl \leftrightarrows NH_2Cl + H_2O \quad \text{(ec. 4)}$$

$$2\ NHCl_2 \leftrightarrows N_2 + Cl_2 + 2\ H^+ + 2\ Cl^- \quad \text{(ec. 5)}$$

$$NHCl_2 + HOCl \leftrightarrows NCl_3 + H_2O \quad \text{(ec. 6)}$$

A la suma de las ecuaciones, mediante las cuales, el amoniaco es oxidado por el cloro a nitrógeno (ec. 3-6), se le conoce como reacción al punto de quiebre, y sus productos de nitrógeno, conforman el cloro combinado, con acción desinfectante leve y lenta.

Además el cloro también reacciona con otros componentes presentes en el agua, como materia orgánica, Fe, Mn, NO_2, H_2S. La cantidad de cloro requerido para que se lleven a cabo estas reacciones, es la demanda de cloro.

Posteriormente el ácido hipocloroso, reaccionará con los microorganismos, eliminándolos, debido a los daños estructurales causados. Siendo está la reacción objetivo de la aplicación del agente biocida, la cual no consume cloro significativamente, dejando cloro libre que desempeñe su acción residual, en caso de contaminaciones posteriores. De este modo la cantidad de desinfectante dosificada debe ser tal que, permita satisfacer la demanda de cloro hasta el punto de quiebre, y además deje cloro remanente o libre de al menos 0,5 ppm.

El comportamiento del cloro descrito es expresado en la siguiente figura:

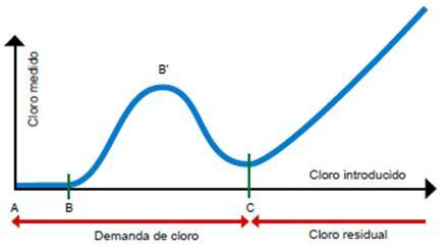


Figura A.2.1. Evolución de la cantidad de cloro residual en función de la cantidad de cloro introducido (Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua, 2010).

En la Fase AB el cloro introducido en el agua se combina inmediatamente con la materia orgánica y otros compuestos. Consecuentemente, el residual medido se mantiene en cero. Mientras no se destruyan estos compuestos, no se producirá la desinfección.

A partir del punto B, el cloro se combina con compuestos nitrogenados. En la fase BB` empieza a aparecer una cantidad de cloro residual. Esta concentración no corresponde al cloro libre realmente activo -ácido hipocloroso-, sino a las cloraminas, que reaccionan igual que el cloro con algunos de los reactivos de los aparatos de medición. Cuando se añade más cloro en la fase B`C, la cantidad de cloro residual, va en descenso. En realidad, el cloro introducido ha servido para destruir los compuestos formados durante la fase BB`, y en este punto el agua sigue sin estar desinfectada.

A partir del punto C, el cloro introducido está finalmente disponible para cumplir su función de desinfectante.

Así el término cloro residual libre se refiere a la suma de HOCl y de OCl^-. Ya que el HOCl es un desinfectante considerablemente más eficaz que el OCl^- y que el cloro libre, incluso como hipoclorito, es más eficaz que el cloro combinado. Se recomienda que la desinfección final produzca una concentración residual de cloro libre de 0.5 mg/L, después de 30 minutos de contacto en agua a pH de <8.0. El término cloro residual combinado se refiere al cloro ligado al nitrógeno, presente en la formación de cloraminas.

b.3.3. Formación de cloro en un sistema de electrólisis en circuito cerrado

El cloruro de sodio reacciona en el sistema de electrólisis, por medio de la aportación de una diferencia de potencial en unos electrodos, de modo que se produce la siguiente reacción a partir de la sal y el agua:

Semireacción en el ánodo: $2\ Cl^-_{(ac)} \rightarrow Cl_{2(g)} + 2\ e^-$ (ec. 7)

Semireacción en el cátodo: $2\ H_2O_{(ac)} + 2\ e^- \rightarrow 2\ OH^-_{(ac)} + H_{2(g)}$ (ec. 8)

La hidrólisis del cloro y la disociación del ácido hipocloroso, forman hipoclorito y cloruro en la disolución:

$$Cl_{2(g)} + 2\ H_2O \rightarrow HClO_{(ac)} + Cl^-_{(ac)} + H_3O^+ \text{ (ec. 9)}$$

$$HClO_{(ac)} + H_2O \rightarrow ClO^-_{(ac)} + H_3O^+ \text{ (ec. 10)}$$

La concentración de cloro disuelto cerca de la superficie del ánodo permanece lo suficientemente baja, como para permitir la evolución del cloro gaseoso y el hipoclorito es el producto principal.

$$2\ NaCl_{(ac)} + 3\ H_2O_{(ac)} \rightarrow 2\ NaOH_{(ac)} + H_{2(g)} + HOCl_{(ac)} + HCl_{(ac)} \text{ (ec. 11)}$$

Cuando el cloro reacciona con el hidróxido de sodio, se forma el cloruro de sodio inerte, porque la mitad del cloro se pierde:

$$Cl_{2(g)} + 2\ NaOH_{(ac)} \rightarrow NaOCl_{(ac)} + NaCl_{(ac)} + H_2O_{(ac)} \text{ (ec. 12)}$$

Sin embargo, como agente oxidante el hipoclorito de sodio se descompone en cloruro de sodio y oxígeno:

$$NaOCl_{(ac)} \rightarrow NaCl_{(ac)} + O_{2(g)} \text{ (ec. 13)}$$

b.3.4. Condiciones favorables para el proceso de desinfección con cloro

Las condiciones favorables para el avance de las reacciones del cloro, están condicionadas por los factores que interfieren en el proceso de desinfección y su eficiencia, como el pH, temperatura, cantidad de cloro disponible, tiempo de contacto y turbiedad. De modo que es indispensable realizar un estudio de estas condiciones en la ASADA de Quebrada Yudo, con el fin de determinar la eficiencia y eficacia del sistema de cloración, de modo que se eviten las consecuencias del mal uso y mantenimiento de la cloración.

Las condiciones óptimas se describen a continuación. El rango de pH óptimo es de 5,5 a 7,5. Como se muestra en la Figura A.2.2 a 20 ºC y pH 7.5, hay una distribución igual de HOCl y el ión hipoclorito (OCl-). A pH 8, solamente cerca del 20% del cloro residual libre está presente como HOCl, mientras que un 80% es OCl-; y por el contrario a pH 6, el 80% es HOCl y el resto OCl-.

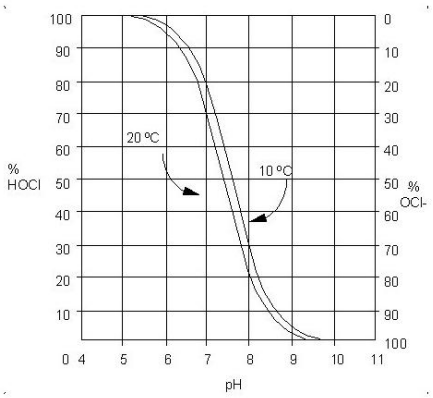


Figura A.2.2. Distribución del ácido hipocloroso y del ión hipoclorito en agua para diferentes valores de pH (Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua, 2010).

Las temperaturas tanto altas como bajas, desfavorecen el proceso y no sucede la reacción, se debe encontrar cercana a los 20ºC.

La cantidad de cloro disponible, debe ser tal que permita que reaccione con el contenido del agua, y todavía reste una concentración de cloro residual de 0,5ppm.

El tiempo de contacto es un requisito indispensable, pues el efecto desinfectante del cloro no es inmediato. Como se describió anteriormente, deben suceder una serie de reacciones, a través del tiempo, hasta obtener la inactivación de microorganismos, oxidación de especies, y otros beneficios de este desinfectante, por esto es recomendable un mínimo de 30 minutos de contacto, antes del consumo del líquido. Si el agua a tratar posee una concentración alta de patógenos o material orgánico, el tiempo de contacto debe ser mayor, determinado por pruebas para cada caso.

Es recomendable que la turbiedad tenga un valor promedio de 1 UNT, y que no exceda los 5 UNT, debido a que la desinfección final, no elimina los parásitos clásicos, como *Giardia* o *Cryposporidium*, aún bajo las mejores condiciones de operación.

b.3.5. Subproductos de la cloración

La desinfección debe realizarse en aguas de una buena calidad química, con objeto de limitar al máximo las reacciones secundarias, generadoras de subproductos como los THM, compuestos que son carcinogénicos, como el cloroformo. El tratamiento previo a la desinfección mediante alguno de los métodos revisados -ya sea con protección de las fuentes de aguas, floculación, sedimentación, filtración- no sólo da mayor seguridad contra el paso de microorganismos patógenos, a través de los sistemas de provisión de agua potable, sino que además ayuda a reducir la generación de subproductos de la desinfección química.

c. Síntesis sobre los métodos de desinfección

Cada una de las alternativas existentes para la desinfección del agua cuenta con ventajas y desventajas, las cuales reflejan en cada método una opción diferente (Cuadro A.2.1). Por lo tanto se debe realizar un análisis exhaustivo de los beneficios y los perjuicios de cada uno, cuando se desean implementar en un sistema de tratamiento de potabilización del agua, y así obtener un balance positivo.

Se deben tomar en cuenta las condiciones de la planta, el caudal tratado, las condiciones locales, la legislación, los costos, los resultados y los inconvenientes. Todo esto para asegurar el funcionamiento y mantenimiento sostenido de la desinfección.

Cuadro A.2.1. Comparación de los principales métodos de desinfección de agua para consumo humano.

Característica	Método de desinfección			
	Cloro	Ozono	Luz UV	Yodo
Eficiencia	alta	alta	alta	alta
Costo	bajo	alto	alto	medio
Productos secundarios	THM	Bormatos y bromoformos	no	no
Efecto residual	sí	no	no	no

El mantenimiento del agua potable de alta calidad cumple un papel fundamental en la labor desarrollada para la protección de la salud pública, asegurar una buena calidad de vida e impulsar un desarrollo sostenible. Para garantizar la calidad del agua se requiere del trabajo multidisciplinario y multisectorial. Algunos biocidas químicos generan subproductos -unos más importantes que otros- al agregarlos al agua que menoscaban la salud humana, por lo tanto se precisa la adición de desinfectantes secundarios que traten esos subproductos. Además de realizar estudios e investigaciones sobre el impacto en la población abastecida.

De los métodos de desinfección, la cloración representa el de uso más generalizado, y el que provee una relación costo-beneficio más favorable.

Microorganismos indicadores de la calidad del agua

Los análisis microbiológicos del agua de consumo y de su calidad sanitaria son de suma importancia, ya que ésta estuviera contaminada con organismos patógenos, afectaría a gran número de personas y se tendrían serias consecuencias además del costo como atención médica.

Para determinar la calidad sanitaria del agua se utilizan microorganismos indicadores, entre ellos están los coliformes totales, los coliformes fecales y *E coli*, estos dos últimos son indicadores de contaminación fecal. Los microorganismos indicadores deben cumplir con los siguientes requisitos:

a. Ser abundantes en los excrementos.
b. Estar ausentes o existir en número reducido en otras fuentes.
c. Fáciles de aislar, identificar, y enumerar.
d. Ser incapaces de desarrollarse en el agua.
e. Sobrevivir más tiempo en el agua que los microorganismos patógenos.
f. Ser más resistentes a los desinfectantes que los microorganismos patógenos.

Los análisis de los microorganismos nombrados se pueden realizar por medio de diferentes metodologías que varían en su especificidad y sensibilidad de acuerdo a lo que se desea obtener.

Los coliformes se caracterizan por su capacidad de fermentar la lactosa con producción de ácido y gas a una temperatura de 35°C - 37°C en presencia de sales biliares, y corresponden a los géneros *Klebsiella, Citrobacter, Enterobacter y Escherichia*. La determinación de los microorganismos nombrados se puede llevar a cabo por medio de diferentes técnicas, de las cuales NMP es la más utilizada.

El NMP se basa en la determinación de presencia o ausencia en réplicas de diluciones consecutivas de atributos particulares de microorganismos presentes en muestras de suelo u otros ambientes, en este caso de coliformes totales, fecales y *E. coli* en agua. Por lo tanto, un requisito importante de este método es la necesidad de poder reconocer un atributo particular de la población en el medio de crecimiento a utilizarse.

El estimado de densidad poblacional se obtiene del patrón de ocurrencia de ese atributo en diluciones seriadas y el uso de una tabla de probabilidad. Para determinación de coliformes totales, fecales y *E. coli* se toman volúmenes de 10, 1 y 0,1 ml en series de 3 ó 5 tubos, con volúmenes de 10, 5 y 5 ml respectivamente.

El NMP consta de tres etapas, una presuntiva en la que se utiliza lauril triptosa, se incuba por 48 horas a 35°C, los tubos positivos (con producción de gas), se transfieren a tubos con bilis verde brillante, por 48 horas a 35°C, siendo esta la prueba confirmada para coliformes totales. Luego los tubos positivos con presencia de gas se transfieren a la prueba confirmada para coliformes fecales a tubos con caldo EC incubados por 24 horas a 44,5°C.

El NMP es una estrategia eficiente de estimación de densidades poblacionales especialmente cuando una evaluación cuantitativa de células individuales no es factible.

Algunas de las ventajas del NMP son:

i. La capacidad de estimar tamaños poblacionales basados en atributos relacionados a un proceso (selectividad).
ii. Provee una recuperación uniforme de las poblaciones microbianas de una matriz determinada.
iii. Determina sólo organismos vivos y activos metabólicamente.
iv. Suele ser más rápido e igual de confiable que los métodos tradicionales de esparcimiento en platos de cultivo.
v. Resulta adecuada cuando la muestra es muy turbia y no se filtra fácilmente.

Se ha cuestionado el uso de grupos CF y CT como microorganismos indicadores, por serias deficiencias en las características que se requieren satisfacer para ser utilizados como tales. Además su ubicuidad en la naturaleza y capacidad de multiplicarse fuera del intestino son desventajas del uso de estos grupos.

Por estas razones se ha difundido el uso de otros indicadores más eficientes y confiables, formando parte de la reglamentación sobre calidad de agua en otros países. Entre estos se encuentran *Pseudomonas aeruginosa* y el grupo de los *Enterococcus faecalis*. Ambos presentan genes de resistencia a antibióticos, y son especies de bacterias mucho más resistentes a los desinfectantes que los CT y CF, debido a las características de sus membranas.

El grupo *Pseudomonas* se conforma por bacilos aerobios gramnegativos y móviles, con producción de pigmentos solubles en agua en algunos casos. Su mayor importancia estriba en su capacidad inhibitoria del grupo coliforme, los microorganismos más utilizados en el orbe para determinar calidad de agua, pudiendo arrogar resultados erróneos en los análisis de aguas. De modo que en presencia de *Pseudomonas* aunque las aguas tratadas muestren estar libres de coliformes, no se puede asegurar su potabilidad. También especies de los géneros *Sarcina, Micrococcus, Flavobacterium, Proteus, Bacillus, Actinomycetos* y levaduras actúan como inhibidores para los coliformes. (Geldreich, Soares y Ontiveros, citados por Marchand, 2002).

Pseudomonas aeruginosa, es un patógeno oportunista de importancia en poblaciones susceptibles. Se asocia a infecciones pulmonares -especialmente neumonía-, urinarias, cutáneas. Es capaz de sobrevivir y multiplicarse en aguas tratadas, al poseer una densa capa polisacárida, con composición química tal que la hace incompatible a las moléculas e iones de Cloro libre residual, contando con una barrera no solo física sino química. Lo cual le concede una resistencia al cloro, superior a la de otros microorganismos aislados del agua. Además producen bacteriocinas con acción antibiótica frente a diversos coliformes como *Escherichia coli, Klebsiella pneumoniae, Citrobacter freundii y Enterobacter agglomerans*. (Reilly y Le Chevallier, citados por Marchand, 2002).

En un estudio comparativo poblacional entre *Pseudomonas aeruginosa* y CF en agua de consumo humano, se encontró que al aumentar la proporción de éstos últimos, los CF disminuyen, debido al efecto bactericida de los catabolitos –piocinas- de *Pseudomonas aeruginosa* sobre coliformes, principalmente *E. coli*, produciendo su disminución o diseminación y resultados erróneos en el control de calidad (Contreras y col. citados por Marchand, 2002). Así *Pseudomonas aeruginosa* constituye un indicador complementario a CT y CF, permitiendo determinar el origen de la contaminación por su asociación a residuos fecales humanos más que animales.

Los estreptococos son bacterias esféricas grampositivas, presentes en pares o cadenas durante el crecimiento. Mientras algunos se encuentran en la microbiota humana en condiciones normales, otros son causantes de importantes enfermedades relacionadas con la sensibilización.

Los Enterococos es un subgrupo de los Estreptococos fecales que engloba a especies como *S. faecalis, S. faecium, S. gallinarum y S. avium*. Los Enterococos son diferenciados de otros estreptococos fecales por su habilidad de crecer en medios con 6,5% de Cloruro de Sodio, a pH 9,6 a 10°C y a 45°C. Son considerados como indicadores de contaminación fecal antigua, debido a su resistencia, que por otra parte cosntituye una ventaja frente a los CF que indican contaminación fecal reciente (SOARES citado por Marchand, 2002). *Enterococcus faecalis* es un comensal del intestino humano, altamente resistente a condiciones adversas. Causa infecciones urinarias, y algunas veces nerviosas.

Soares indica que los Estreptococos fecales poseen mayor significado sanitario que *Escherichia coli*, rara vez se multiplican en agua contaminada, son muy resistentes al secado, poseen una supervivencia superior a los coliformes en aguas, siendo los únicos indicadores de contaminación fecal, cuando su foco es muy distante (citado por Marchand, 2002).

La razón entre CF y estreptococos fecales brinda información acerca de la fuente de contaminación, diferenciando la contaminación fecal del hombre de otros animales de sangre caliente con un rango mayor de 4, mientras que un valor menor a 0,7 sugiere contaminación por una fuente no humana.

Diferentes investigadores (Cabelli et all, Fleisher y col, Seyfried y col citados por Marchand, 2002) han encontrado una alta correlación entre la densidad de Estreptococos fecales y la aparición de casos de gastroenteritis, no así entre éstos con CF. De este modo se está expuesto a un mayor riesgo de contraer enfermedades entéricas, al consumir aguas con un alto nivel de Enterococos.

Anexo 3

Situación de las ASADAS en Costa Rica

La prestación de los servicios de agua potable y alcantarillado sanitario en Costa Rica, le corresponde al AyA, como ente operador y rector, encargado de brindar servicios de distribución de agua a la población. El AyA forma parte del SAPS, así como otros operadores de sistemas: ESPH S.A., las municipalidades, CAARs, las ASADAS y algunas organizaciones privadas menores que operan acueductos o sistemas individuales (pozos excavados o nacientes).

La función del esencial del AyA se relaciona con las acciones siguientes: normar, gestionar, planear, financiar, desarrollar, asesor al Estado, en materia de agua potable, aguas negras, vertidos industriales, agua pluviales, y control de contaminación del recurso hídrico. Asimismo el AyA le corresponde administrar y operar directamente los sistemas de acueductos y alcantarillados sanitarios de todo el país, y garantizar la continuidad del servicio de agua potable. (OPS, 2003)

Los CAAR´s son organizaciones comunales que se encargan del suministro de agua potable, que en teoría deberían estar amparados y tutelados por el AyA, que pasan a ser ASADAS, en los 90`s con personería jurídica y reglamento de operación y administración (OPS, 2003).

La situación de estas entidades para el año 2002 es preocupante. De acuerdo al informe sobre Calidad del agua potable en Costa Rica (OPS, 2003), el objetivo de las ASADAS radica en "*administrar, operar y mantener en buenas condiciones el acueducto y el alcantarillado sanitario (cuando exista), de acuerdo a las normas y políticas que al respecto emita el AyA*." Pero además establece que ésta última institución, tiene el deber de supervisar el servicio que prestan las ASADAS, "*además debe ejercer absoluto control y fiscalización sobre la labor de estas asociaciones*", apara determinar si están efectuando o no una correcta administración del recurso hídrico.

Sin embargo los resultados del estudio en cuestión, con respecto a las ASADAS, es preocupante y muestra el raquítico cumplimiento de la labor de control y fiscalización del AyA sobre ellas. En cuanto a la infraestructura que administran los CAAR`s y ASADAS entre un 55 y 50% se encuentra en condiciones regulares a malas, y solo un 45 y un 50% son aceptables a buenas. Es decir de los 1648 acueductos que administran estos entes, de 906 a 824 acueductos se encuentran condiciones de regulares a malas.

Con la mitad de infraestructura rural de potabilización en mal estado, qué calidad se debería esperar para el agua producida bajo esas condiciones, aunado al hecho, que su administración se encuentra en manos de vecinos que en la mayoría de casos, posee nulo conocimiento en materia de agua potable. Además los CAAR`s y ASADAS suministran el agua de bebida, al 23% de la población nacional (Figura A.3.1), de la cual 88,7% ingiere agua no clorada (20,4% de la población nacional) (Cuadro A.3.2), debido a que un 70,5% de acueductos bajo estos entes no cuentan con cloración (Cuadro A.3.1).

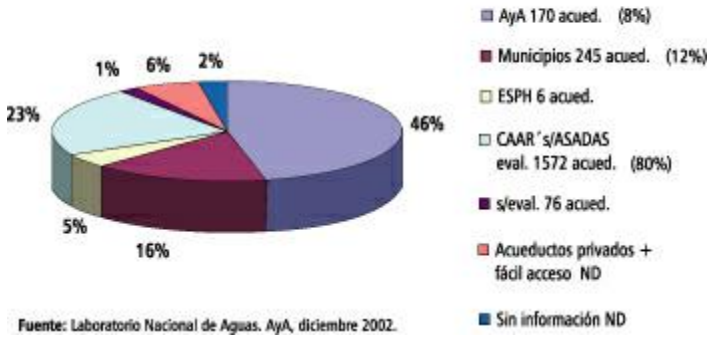


Figura A.3.1. Población total del país por ente operador al 2002 (OPS, 2003).

Cuadro A3.1. Población abastecida con agua clorada y no clorada por ente operador, para el año 2002 (OPS, 2003).

Ente operador	Clorados		No clorados	
	N°	%	N°	%
AyA	1.850.119	49,5	42.153	1,1
Municipalidades	372.438	10,0	297.871	8,0
ESPH	191.481	5,1	0	---
ASADAS/CAAR´s	217.612	5,8	763.687	20,4
TOTAL	2.631.650	70,5	1.103.711	29,5

Fuente: Laboratorio Nacional de Aguas AyA

Cuadro A.3.2 Total de sistemas según ente operador para el año 2002 (OPS, 2003).

Ente operador	Total		Clorados		No clorados	
	N°	%	N°	%	N°	%
AyA	170	8,2	138	6,7	32	1,5
Munic.	245	11,8	82	4,0	166	8,0
ESPH	6	0,3	6	0,3	0	---
CAAR´s/ ASADAS	1.648	79,7	190	9,2	1.458	70,5
Total	2.069	100	416	20,1	1.656	80,0

Fuente: Laboratorio Nacional de Aguas AyA

Dentro de las conclusiones del informe mencionado, se incluyen con respecto a las ASADAS:

a. *"Se observan grandes deficiencias o ausencia de control de calidad del agua en los acueductos operados por las municipalidades y CAARs/ASADAS."*
b. *"…falta de un adecuado sistema de vigilancia y control de la calidad del agua constante e integral a nivel nacional…"*
c. *"La situación de la baja calidad del agua potable entregada a casi la mitad de la población atendida por las ASADAS, representa una importante deficiencia que deberá ser solucionada en el corto plazo, a fin de proteger la salud de esa población."*
d. *"Existe mayor deficiencia* [en suministro] *en los acueductos administrados por las ASADAS y CAAR´s."*

Estas conclusiones establecen que las condiciones de los CAAR`s y ASADAS, deben ser mejoradas a corto plazo, y la revisión de su situación para el año 2009 demuestra que así sucedió (Arias, 2010). En cuanto a cloración se aumentó en un 63,9% el número de acueductos con este tratamiento, pertenecientes a estos entes, pasando de un 5,8% de acueductos con cloración en el 2002 a 69,7% para el 2009 (Cuadro A.3.1). Reduciendo así de un 20,4% en el 2002 a un 12,7% la población abastecida con agua no potable para el 2009. Pese a esto Arias señala que la tecnología de potabilización en estos acueductos, encaso de poseerla, es sumamente básica, funcionando en la mayoría de las veces de manera intermitente.

Cuadro A3.3. Cobertura de agua potable en función del ente operador (2006-2009). (Arias, 2010).

Ente que suministra el agua potable	2006	2007	2008	2009
AyA	98.6 %	97.8 %	98.2 %	98.9 %
ASADAS	59.1 %	59.8 %	58.7 %	69.7 %
MUNICIPALIDADES	70.1 %	76.3 %	78.8 %	79.4 %
ESPH	99.7 %	100 %	99.6 %	100 %
TOTAL	81.2 %	83.5 %	83.4 %	87.3 %

Costa rica es un país con abúndate recurso hídrico, lo cual constituye una gran ventaja, con respecto a países donde el recurso es sumamente limitado y de difícil acceso. Sin embargo irónicamente se ha tornado en una desventaja, ya que las deficiencias en la administración nacional y local de este recurso, afectan su estado y la calidad del agua suministrada, lo que ha provocado una gran vulnerabilidad de los acueductos, transformándose en una de las principales amenazas de la salud de la población.

Las razones de este deterioro de acuerdo a Mora (2003), se deben a un "*marco institucional disperso en una gran cantidad de entes, en la práctica desarticulados, que dan lugar a problemas de traslape de competencias, vacíos y duplicación de funciones. La ausencia de una rectoría clara, fuerte y orientada a la defensa sanitaria de los ciudadanos afecta notoriamente la posibilidad de realizar un uso eficiente de este importante recurso.*"

Situación que sufre las ASADAS al estar inmersas en una problemática tan compleja y que el Gobierno no ha logrado superar, ya que por sí solas no pueden llegar a brindar agua de calidad potable, porque aunque sobre voluntad de su parte, requieren urgentemente de asesoría, capacitación y fiscalización de un ente calificado, que en este caso, la legislación establece como responsable al AyA, que pese a ello brilla por su ausencia.

Se han dado pasos importantes para la mejora de esta problemática, como es la creación de la Red Ambiental Nacional en Agua y Saneamiento de Costa Rica (RANAS) por parte de CONARE y AyA en el año 2008. Siendo una "*organización dedicada al desarrollo de actividades académicas, técnicas, científicas, de apoyo e intercambio, de carácter intersectorial y multidisciplinario, que busca establecer un canal entre los operadores de sistemas de agua y saneamiento y las universidades e instituciones de capacitación y formación profesional, para la reunión, discusión, preparación de propuestas y acciones en el ámbito del Agua y el Saneamiento"* (Declaración constitutiva de RANAS, 2008). De modo que se espera que la problemática en el tema de agua y saneamiento en el país no sólo sea correctamente diagnosticada, sino también abordada, con soluciones atinadas para lograr un estado de desarrollo en este aspecto, tal y como lo expone la declaración de esta Red.

Debido a la carencia de conocimiento y tecnología adecuada que presentan las ASADAS, es en acciones como la mencionada, donde descansa la promesa de un camino diferente al que han venido transitando estas asociaciones, hasta el momento escarpado, incierto, inseguro y oscuro. Esperando que el compromiso de facilitar con "*el conocimiento generado y sistematizado, un desarrollo integral en lo político, económico, social, cultural y ambiental, en especial a comités locales como las ASADAS…"*, no quede solamente en el papel sino que enderece, allane y enrumbe ese camino.

Anexo 4

Parámetros y fórmulas de diseño de un sistema de FGDi

Parámetros y fórmulas de diseño:

a) **Periodo de diseño (años):** 8-12.

b) **Período de operación (h/d): 24**. En estaciones de bombeo de agua con períodos de bombeo inferiores a 24 h/día, se recomienda proyectar un almacenamiento de agua cruda, a partir del cual se suministre agua de manera continua al FGDi y demás componentes.

c) **Número de filtros (N):** el número mínimo corresponde a 2 unidades paralelas, que permitan realizar la limpieza, mantenimiento o para que en caso de falla de uno de los filtros, no se interrumpa el tratamiento del agua.

d) **Velocidad de filtración Vf (m/h): 2-3.** Depende de la calidad del agua cruda. A mayor contaminación del afluente, menor velocidad de filtración.

e) **Velocidad superficial del flujo durante el lavado superficial Vs (m/s):**

$$(3{,}40 \cdot QL/b)^{1/3}.$$

Donde,

b = ancho del filtro.

QL = caudal disponible para el lavado superficial. Se adopta a QL= Qd.

Vs = Velocidad superficial de lavado.

Los valores recomendados están en el ámbito de 0,15-0,3 m/s. La velocidad superficial depende del tipo de material predominante en el agua cruda. Se asume una velocidad cercana a 0,15 m/s cuando predominan limos y material orgánico, y superior a los 0,2 m/s para arenas y arcillas.

f) **Área de filtración por unidad Af (m2):** Qd/Vf. Debe ser menor a 10.

g) **Lecho Filtrante (m):** 0,5-0,7. Granulometría y espesor de acuerdo a Cuadro A.4.1.

Cuadro A.4.1 Características del lecho filtrante de un FGDi (Cepis, 2005).

Posición en la Unidad	Espesor de la Capa (m)	Tamaño de Grava (mm)
Superior	0.20	3.0 - 6.0
Intermedio	0.20	6.0 - 13.0
Inferior, Fondo	0.20	13.0 - 25.0

h) **Lecho soporte (m):** 0,3. De acuerdo a Cuadro A.4.2.

Cuadro A.4.2. Características del lecho de soporte de un FGDi (Cepis, 2005).

Capa	Tipo	Diámetro de la partícula (mm)	Espesor de la capa (mm)
Superior	Arena gruesa	1 - 2	50
Segunda	Grava fina	2 - 5	50
Tercera	Grava	5 - 10	50
Inferior	Grava gruesa	10 - 25	150

i) **Altura del vertedero de salida (m):** 0,03-0,05. Medidos a partir del lecho superficial de grava fina.

j) **Caudal de entrada medio diario de la planta de tratamiento (Qe m^3/d).**

k) **Caudal de diseño (Qd):** Qe/N.

l) **Cámara de filtración:** La razón largo/ancho debe estar entre 3:1 a 6:1, recomendable para diseño 5:1 ó según sea la realidad de la zona en estudio.

- **Ancho del filtro (b):** $b = (Af/N)^{1/2}$.
- **Longitud total del filtro (Lf):** L = As/b.

A la longitud (L) se le debe agregar, el largo de la caja de recuperación de arena y la longitud de la cámara de disipación. Ambas deben ser 1/5L, (20%) de la longitud del filtro), de modo que L debe aumentarse en un 0,40%.

Lf = Lx1, 4.

- **Pared de la caja de filtro (Pf):** Hf = Hls + Hlf + Hbl.

Donde,

Hf: altura de la pared de caja (m).

Hls: altura del lecho de soporte (0,2m).

Hlf: altura de lecho de arena (0,5-0,7m).

Hbl: altura borde libre (0,2m).

- **Pendiente:** Se supone una pendiente de 1% en toda la superficie del filtro.

m) Cámara de lavado: se recomiendan áreas superficiales entre 3 y 5m^2, con profundidades entre 0,20 y 0,40 m.

n) Cámara de entrada:

- **Lámina de agua sobre la cresta (h):**

h= **(**Qd/Mb)$^{2/3}$.

Donde,

Qd = Caudal de diseño (m^3/s).

b = Longitud de la cresta del vertedero (m).

h = Lámina de agua sobre la cresta (m).

M = Coeficiente para vertedero de pared gruesa, igual a 1,84.

o) Tubería de Drenaje

p) Se deben realizar los cálculos con base en el cuadro A.4.3.

Cuadro A.4.3. Parámetros de diseño para la tubería de drenaje.

Relaciones de diseño en tuberías	Valor
Área total de orificios /Área de filtración	0,0015 - 0,005
Área del tubo lateral /Área orificios laterales	1,67 - 5,00
Área del tubo colector /Área de tubos laterales	2,00 - 4,00
Separación entre orificios	0,08 - 0,3 m
Separación entre laterales	0,5 - 1 m

q) **Diámetro de los orificios (D):** 6 - 19 mm. De acuerdo a brocas.

r) **Área de cada orificio Ao**: (Π·D^2)/4.

s) **Caudal que ingresa a cada orificio** (Qo): Ao·Vo

t) **Velocidad de flujo en cada orificio** (Vo) = 4-5 m/s.

u) **Número de orificios**: QL/Qo.

v) **Área total de los orificios (Ato)**: NoAo.

w) **Longitud de lateral (Ll):** 100b-Stp-Sto-Dtp.

Donde,

Stp: Separación de tapón y pared = 10 cm.

Sto: Separación de Tee y orificios = 4cm.

Dtp: Diámetro de tubo principal (cm) = Di/10.

Di= Diámetro interno de tubería principal (mm). Asumido.

x) **Separación entre orificios (So)** = 8cm.

y) **Separación entre Laterales** (Sl) =0,90m.

z) **Número de orificios por lateral (Nol):** 2 Longitud de lateral (Ll)/ Separación entre orificios (So).

Factor de multiplicación dos, ya que son dos hileras por lateral.

aa) **Área de los orificios en cada lateral (Aol):** Número de orificios por lateral (Nol) · Área de cada orificio (Ao).

bb) Diámetro interior del tubo lateral

Dtl (mm): (4·A/Π) ^ (1/2)

Donde,

A: Área del tubo lateral = 2Área de orificios en cada lateral (Aol) Asumido.

El resultado se aproxima al valor mayor más próximo del diámetro de tubería comercial disponible.

Se recalcula el diámetro interior del tubo lateral (Dtl), con la fórmula: (Π·Dtl^2)/4, utilizando el diámetro de tubería comercial determinado anteriormente.

cc) Largo del colector lateral (Lcl)= (Ll+Sto)/100

Donde,

Ll: Longitud de lateral

Sto: Separación de Tee y orificios.

dd) Cálculo del diámetro del colector principal

- Área del tubo colector (Atc) = 2 Área de N tubos laterales.
- Área de tubos laterales= A: Área del tubo lateral.

Generalmente, al colector principal llegan dos laterales, dependiendo del ancho del filtro. En este caso al colector sólo llega un lateral, por lo tanto N=1.

- **Diámetro interno del colector principal** Dcp= (4Atc/Π)^(1/2). El resultado se aproxima al valor mayor más próximo del diámetro de tubería comercial disponible.

Se recalcula el diámetro interior del **colector principal**, con la fórmula:

(Π·Dcp ^2) /4, utilizando el diámetro de tubería comercial determinado anteriormente.

ee) Largo del colector principal (Lcp): (Ll-1)·Sl+Sl/2+0,7

Donde,

Ll: Longitud de lateral.

Sl: Separación entre Laterales.

ff) Cálculo de las pérdidas de carga

- **En la grava**

$hg=Q\cdot R^2/823,7598\cdot d^{1,67}\cdot L$

Donde,

hg = Pérdida de carga (m).

d = Diámetro de la grava (m).

Q = Caudal a filtrarse (m^3/s).

R = La mitad de la distancia entre laterales (m). R=Sl/2

L: Espesor de la capa (Límite inferior del ámbito dado).

Se calculan las pérdidas en cada capa del lecho, tomando los datos de diseño de los cuadros A.4.1 y A.4.2 y se suman para obtener la pérdida total de carga en la grava (Hg).

Hg = hg1 + hg2 + hg3.

- **En los orificios**

$ho= Qo^2/Cd\cdot Ao^2\cdot 2g$

Qo=Qd/No.

Donde,

Qo = Caudal de cada orificio.

Cd para orificios= 0,60.

Ao = Área de cada orificio.

Aot = Área total de orificios. Aot=Ao·No.

Qd = Caudal de diseño.

g = aceleración de la gravedad = $9,81 m/s^2$.

- **En tuberías**

$hp = 0,0175\cdot L\cdot V^2/3D\cdot 2g$

Donde,

L: Largo del colector.

D: Diámetro del colector.

V: Velocidad del colector.

Se calculan las pérdidas para el colector principal y para los laterales y se suman para obtener la pérdida total en tuberías.

- **En colector principal**

Largo del colector = Lcp.

Velocidad del colector = Velocidad del colector principal:

QL/A

Donde,

QL: Caudal de lavado.

A; Área del tubo colector principal.

a. En colectores laterales

Largo del colector = Largo del colector lateral (Lcl)

Velocidad del colector = Velocidad del colector lateral

QL/Al/Nl

Donde,

Al: Área del tubo lateral.

QL: Caudal de lavado.

Nl: Número de laterales asumidos.

b. En accesorios

$Hf=kV^2/2g$.

Donde,

K: coeficiente de pérdida de característico de cada accesorio (Cuadro A.4.4.).

Cuadro A.4.4.Coeficiente de pérdida (k) de cada accesorio.

Accesorio	K
Codos 90°	0,9
Tees	0,4
Reducciones	0,3
Válvula Mariposa	2,5
Descarga	1

Pérdida total: ht=hgt+hp+hl+hf

Anexo 5

Proceso de diseño de FGDi para la planta potabilizadora Quebrada Yugo

Cuadro A.5.1. Proceso de diseño del FGDi para la planta potabilizadora de Quebrada Yugo

PROYECTO:	OPTIMIZACIÓN DE SISTEMA DE TRATAMIENTO
ASADA:	QUEBRADA YUGO

DISEÑO DE FILTROS GRUESOS DINÁMICOS

DATOS INICIALES: INGRESO DE VALOR Q		
CAUDAL DE DISEÑO (Q) =	8,000	L/s
DE PLANTA TRATAMIENTO =	28,80	m3/h

EN EL PRESENTE PROYECTO SE HA DECIDIDO:

DISEÑAR DOS FILTROS GRUESOS DINÁMICOS, LOS CUALES CADA UNO TRABAJARÁ CON EL 65% DEL CAUDAL DE LA PLANTA DE POTABILIZACIÓN

PARÁMETROS DE DISEÑO

Caudal de entrada o diseño planta tratam.(Qe) =		8,000	l/s
Caudal por filtrar en cada filtro(Qf) =	50%	4,000	l/s
		0,004000	m3/s

Velocidad de filtración (Vf) = 0,50 - 3,00 m/h			
Velocidad adoptada		2,000	m/h
		0,000555556	m/s
Velocidad superficial de lavado (Vs) =	0,15 - 0,30	m/s	
Velocidad de lavado (VL)=	18,00	m/h	

CALCULO DEL AREA SUPERFICIAL

As = Qf / Vf	As =	7,20	m2.
Donde:			
Qf = caudal a filtrarse (m3/s)			
Vf = velocidad de filtración (m/s)			

CÁLCULO DE LAS DIMENSIONES DEL FILTRO

ANCHO (IMPUESTO) b =	1,50	m
POR TANTO: L = As/b		
L =	4,80	m

MEDIDAS ADOPTADAS DEL FILTRO GRUESO DINÁMICO:

LARGO DE FILTRO	L =	4,80 m
ANCHO DE FILTRO	b =	1,50 m

Área de filtración = b*L	7,20	m2
Largo total	6,70	m2

se debe aumentar un 0,40% para las cámara de disipación (20%) y de recuperación de arenas(20%).

COMPROBACION DE LA VELOCIDAD SUPERFICIAL DE LAVADO

$$b = 3,40 \cdot \frac{QL}{Vs^4}$$

$$Vs = \sqrt[4]{\frac{3,40 \cdot QL}{b}}$$

GUIAS PRELIMINARES DE DISEÑO DE FILTROS GRUESOS DINÁMICOS

Criterio	Valores Recomendados
Periodo de Diseño (años)	15
Periodo de Operación(h/d)*	24
Velocidad de Filtración (m/h)	2 a 3
Número mínimo de unidades en paralelo	2
Area de filtración por unidad (m2)	< 10
Velocidad superficial de flujo durante el lavado (m/s)	0,15 a 0,3
Lecho Filtrante	
.- Longitud	0,6
.- Tamaño de gravas	Ver tabla 3
Altura del vertedero de salida	0,03-0,05(**)

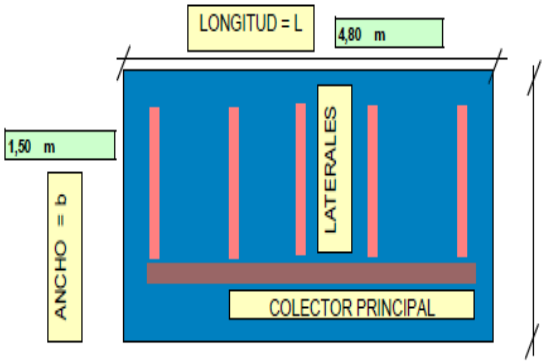
(*) En estaciones de bombeo, con períodos de bombeo inferiores a 24 h/dia se recomienda prever un almacenamiento de agua cruda, a partir del cual se suministre agua de manera continua al FGDi

(**) medido a partir del lecho superficial de grava

Especificaciones de Lecho Filtrante recomendado para FGDi

TABLA 3

Posición en la Unidad	Espesor de capa (m)	Tamaño de grava (mm)
Superior	0,20	3,0 - 6,0
Intermedio	0,20	6,0 - 13,0
Inferior, Fondo	0,20	13,0 - 25,0



COMPROBACION DE LA VELOCIDAD SUPERFICIAL DE LAVADO

$$b = 3,40 \cdot \frac{QL}{Vs^3}$$

$$Vs = \sqrt[3]{\frac{3,40 \cdot QL}{b}}$$

Donde:		
b = ancho del filtro =	1,50 m	
QL = caudal disponible para el lavado superficial		
Vs = Velocidad superficial de lavado =	0,15 - 0,30	m/s

Adoptamos el caudal de lavado igual al caudal de ingreso al filtro =		4,000 l/s.	SE ESCOGEN DOS FILTROS DE 7,2 m2
Vs =	0,21 m/s		
ATENCIÓN ——>>>		DENTRO DE NORMA	
		ENTRE 0.15 - 0.30 m/seg.	
		ES ACEPTABLE	
Pared de la caja de filtro	0,95 m	se debe considerar 0,2m de borde libre	

CÁMARA DE ENTRADA

CÁLCULO DEL NIVEL DEL AGUA SOBRE EL VERTEDERO RECTANGULAR DE PARED GRUESA

$$H = \left[\frac{Qe}{Mb}\right]^{2/3}$$

Qe = Caudal de ingreso m3/s.	0,004000	m3/seg
b = Longitud de la cresta del vertedero (m)	1,50	m.
H = Lámina de agua sobre la cresta (m)	? CALCULAMOS	
M = Coeficiente para vertedero de pared gruesa =	1,84	
H = 0,0128 m.	H = 1,00 cm.	
La altura del agua sobre el vertedero de entrada debe ser	1,00 cm	para que ingrese el caudal requerido

SISTEMA DE DRENAJE

LA VELOCIDAD DE LAVADO (VL) DEL FILTRO ADOPTAMOS EN :			18,0 m/h
CAUDAL DE LAVADO QL	= A x Vl		
A = Área de filtración	A = 4,80 m	x	1,50 m
	A = 7,20 m2		
QL = 129,6	m3/h		
QL = 0,0360	m3/s		

LA TUBERÍA DE DRENAJE DEBE CUMPLIR CON LAS SIGUIENTES REGLAS GENERALES:

1.- Area total de orificios / Area de filtración = (0,0015 - 0,005)

2.- Area del tubo lateral / Area orificios laterales = (1,67 - 5,00)

3.- Area del tubo colector / Area de tubos laterales = (2,00 - 4,00)

4.- Diámetro de orificios= (6 - 19 mm)

5.- Separación entre orificios= (0,08 - 0,3 m)

6.- Separación entre laterales= (0,5 - 1 m)

7.- Velocidad de flujo de orificios= (4 -5 m/s)

1.- DIÁMETRO DE LOS ORIFICIOS

DIÁMETRO DE CADA ORIFICO (ADOPTADO) =	12,5	mm	
Area de cada orificio Ao =	0,00012272	m2	A = (π*D^2)/4
VELOCIDAD EN CADA ORIFICIO (Vo) =	(4.00 - 5.00) m/s.		
ADOPTAMOS Vo =	4	m/seg	

EL CAUDAL QUE INGRESA EN CADA ORIFICIO (Qo) SERÁ:

Qo = Ao x Vo

Qo = 0,00049088 m3/s.

Nº de orificios = CAUDAL DE LAVADO / CAUDAL DE CADA ORIFICIO

QL = 0,0360 m3/seg

Nº de orificios = QL / Qo

Nº de orificios = 73,34 ORIFICIOS

			ASUMIMOS	
Orificios calculados =	73	ORIFICIOS CALCULADOS	181,5	ORIFICIOS

Area total de los orificios =	181,5	x Ao
Ato =	0,02227345	m2

COMPROBAMOS:

Area total de orificios = (0,0015 - 0,005) =	2,227E-02	=	0,003094	
Area de filtración	7,20 m2		ATENCIÓN ——>>>	DENTRO DE NORMA
				DEBE ESTAR ENTRE 0,0015 A 0,005 OK!

2.- CÁLCULO DEL DIÁMETRO DE LOS LATERALES

Número de laterales asumidos =	6	Laterales		
Longitud de lateral =	121	cm	DIAMETRO DE TUBO PRINCIPAL=	15 cm
Separación entre orificios =	8	cm	SEPARACIÓN DE TAPON Y PARED=	10 cm
Separación entre Laterales =	0,90	m	SEPARACIÓN DE TEE Y ORIFICIOS=	4 cm
Número de orificios por lateral =	30	Orificios		
Diámetro del orificio =	12,50	mm		
Area del orificio =	1,227E-04	m2		

SON (6) LATERALES A PARTIR DEL COLECTOR PRINCIPAL CON (30) ORIFICIOS EN CADA LATERAL

El Area de los orificios en cada lateral será = 30 x Ao = 3,712E-03 m2

Area del tubo lateral = (2,00 - 4,00)			
Area orificios laterales		ASUMIMOS =	2
Area del tubo lateral = Area orificios lateral X 2			
Area del tubo lateral =	0,007424484	m2	

CALCULAMOS EL DIÁMETRO INTERIOR DEL TUBO LATERAL = (4*A/PI) ^ (1/2)

D int = 0,097227182 m. = 97,23 mm.

SE ASUME TUBERÍA DE DIÁMETRO =	100	mm	x	0.80 Mpa.
DIAMETRO INT.=	100	mm		
AREA =	0,0079	m2		

COMPROBAMOS:

Area del tubo lateral = (2,00 - 4,00)	7,854E-03	=	2,116	
Area orificios laterales	0,0037		ATENCIÓN ——>>>	DENTRO DE NORMA
				DEBE ESTAR ENTRE 2.00 - 4.00

3.- CÁLCULO DEL DIÁMETRO DEL COLECTOR PRINCIPAL

Area del tubo colector / Area de N tubos laterales	= (1,67 - 3,00)	
N =	1 LATERAL	Un tubo llega en cada nudo

ASUMIMOS = 2

NOTA: Generalmente, al colector principal llegan dos laterales, En este caso al colector sólo llega un lateral

Area del tubo colector =	2	x	Area de N tubos laterales
Area de tubos laterales =	1 LATERAL	x	Area de cada lateral
Area de N tubos laterales =	0,007854	m2	
Area del tubo colector =	0,015708	m2	

CALCULAMOS EL DIÁMETRO INTERIOR DEL TUBO COLECTOR = (4*A/PI) ^ (1/2)

D int =	0,141421356	m.
	141,42	mm

DIÁMETRO DE TUBERÍA ASUMIDO =	150	mm
	x	0.80 Mpa.
DIÁMETRO INT.=	150	mm
ÁREA =	0,0177	m2

COMPROBAMOS:

Area del tubo colector / Area de N tubos laterales	= (1,67 - 3,00)	0,0177 / 0,007854	= 2,25

ATENCIÓN ——>>> DENTRO DE NORMA

DEBE ESTAR ENTRE 1,67 - 3,00

RESUMEN:

Número de laterales =	6	Laterales
Longitud de cada lateral =	121	cm
Perforaciones por c/lateral =	30	Orificios
Diámetro de perforación =	12,50	mm
Separación entre Orificios	8	cm
Separación entre Laterales	90,00	cm

MATERIAL FILTRANTE

Las especificaciones técnicas dadas en las normas para filtros gruesos dinámicos nos indican que la Grava gruesa, media y fina deben cumplir con las siguientes características:

POSICION EN EL LECHO	ESPESOR DE CAPA EN m.	DIAMETRO mm.	PARAMETRO
SUPERIOR	0,20	3,0 - 6,0	GRAVA FINA
INTERMEDIO	0,20	6,0 - 13,0	GRAVA MEDIA
INFERIOR	0,20	13,0 - 25,0	GRAVA GRUESA

CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE CARGA

EN LA GRAVA:

$$hg = \frac{Q \cdot R^2}{4000 \cdot d^{1,67} \cdot L}$$

$$h_g = \frac{Q \cdot R^2}{823,7598 \cdot d^{1,67} \cdot L}$$

En donde:

hg = Pérdida de carga (pies)

d = Diámetro de la grava (pies)

Q = Caudal a filtrarse (pies3/s)

R = La mitad de la distancia entre laterales (pies)

hg = Pérdida de carga (m)

d = Diámetro de la grava (m)

Q = Caudal a filtrarse (m3/s)

R = La mitad de la distancia entre laterales (m)

R = La mitad de la distancia entre laterales (pies)	0,90	m

	Q =	4,000	l/s =	0,141258667	pies3/seg.	
	R =	0,45	m. =	1,4764	pies	
GRAVA SUPERIOR:						
L (espesor de la capa) =		0,20	m	0,6562	pies	
d (diámetro efectivo grava) =		3,00	mm	0,00984252	pies	
hg1 =	0,263540687	pies	0,08033	m	8,033	cm.
GRAVA INTERMEDIA:						
L (espesor de la capa) =		0,20	m	0,6562	pies	
d (diámetro efectivo grava) =		6,00	mm	0,019685039	pies	
hg2 =	0,082818542	pies	0,02524	m	2,524	cm
GRAVA INFERIOR:						
L (espesor de la capa) =		0,2	m	0,6562	pies	
d (diámetro efectivo grava) =		13,0	mm	0,042650919	pies	
hg3 =	0,022769567	pies	0,00694	m	0,694	cm
PÉRDIDA TOTAL EN LA GRAVA.						
Htg = hg1 + hg2 + hg3						
Htg =	0,1125	m	11,251	cm		

EN LOS ORIFICIOS

FORMULA DE TORRICELLI

$$ho = \frac{Qo^2}{Cd^2 * Ao^2 * 2 * g}$$

$$Qo = \frac{Qf}{\#totalorificos}$$

Donde:

Qo = Caudal de cada orificio			
Cd para orificios =	0,60		
Ao = Area de cada orificio =	0,0001227	m2	
Aot = Area total de orificios = Ao x # orificios =	0,022273453	m2	
g = aceleración de la gravedad = 9,81	9,81	m/s2	
Qf = Caudal a filtrarse o drenar =	4,000	l/s	0,004 m3/s
# total de orificios =	181,5	ORIFICIOS	

Qo =	2,20386E-05	m3/s		
ho =	0,00457	m	0,456807851	cm

EN TUBERIAS:

$$h_p = \frac{1}{3} \cdot \frac{0,0175 \cdot L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g}$$

1.	COLECTOR PRINCIPAL		
	L: Largo del colector=	5,65	m
	D:Diametro del colector=	0,15	m
	V:Velocidad del colector=	2,04	m/s
hp=	0,04648	m	
2.	COLECTOR LATERAL		
	cantidad de colectores=	6	
	L: Largo del colector=	1,25	m
	D:Diametro del colector=	0,1	m
	V:Velocidad del colector=	0,76	m/s
hl=	0,01301	m	

EN ACCESORIOS:

$$hf = K \frac{V^2}{2g}$$

ACCESORIO	K	hf
Codos 90°	0,9	0,3807
Tees	0,4	0,4230
Reducciones	0,3	0,0635
Valvula Mariposa	2,5	0,5288
Descarga	1	0,2115
	TOTAL	1,6076

formula laterales -1

hf=	1,60758	m

PÉRDIDA TOTAL:

ht = hgt+ho+hp+hl+hf

ht =	1,7841	m	178,4147292	cm

Anexo 6

Filtración Dinámica

OPS, CEPIS, 2003.

Manual de Operación y Mantenimiento del FGDi

La operación de un filtro dinámico es muy simple. Solo se requiere unos minutos para disponer todo lo que necesita un FD para mantenerse "saludable" (es decir, suministrar agua limpia y segura en la tasa de producción esperada). El operador debe realizar dos actividades: la inspección sanitaria y la operación de limpieza.

1. Inspección del sistema

El operador debe realizar la inspección sanitaria del entorno. El concepto de "inspección sanitaria" se desarrolló hace más de una década y, desde entonces, ha sido promocionado por los especialistas asociados con la Organización Mundial de la Salud. Se descubrió que las inspecciones sanitarias eran una manera rápida, eficiente, fácil y económica de evitar problemas cuando se trataba de programas de control de la calidad del agua. Una buena inspección sanitaria permite detectar los problemas antes de que causen daños o deterioren el producto final: el agua potable.

La inspección de este tipo en un FG demanda muy pocos recursos. Cualquier operador, con un mínimo de habilidad, puede desempeñar esta tarea y detectar cualquier problema potencial o real a fin de darle una solución.

Durante la inspección, el operador debe verificar el estado y la condición de la captación, de los canales, de las tuberías, de las válvulas y del filtro en sí. Las obstrucciones, daños, fugas o cualquier otro problema se deben corregir inmediatamente. Si el operador no pudiera resolverlos por sí mismo, deberá reportarlos rápidamente a la autoridad más cercana.

Es importante que lea los medidores y que anote la cantidad de agua que se produce (lectura instantánea) y la cantidad producida (lectura volumétrica).

Si fuera posible analizar el agua en relación con la turbiedad y el contenido de *E. coli*, el operador deberá recolectar las muestras correspondientes. Todas estas evaluaciones se deben anotar en formularios adecuados, los cuales deben ser muy simples.

2. Limpieza del filtro

El filtro debe tener dos limpiezas: una limpieza diaria y otra estacional. Al limpiar el filtro diariamente, el operador restaurará el filtro hasta que tenga la capacidad del día anterior. Casi no notará la disminución de la tasa de filtración. No obstante, habrá suciedad y partículas que empezarán a depositarse en las capas inferiores del filtro y se empezará a notar la pérdida de carga (esto dependerá de la calidad de agua cruda y sucederá incluso si la limpieza diaria se realiza adecuadamente).

Si el filtro tiene una caja de agua filtrada, la pérdida de carga se verá en el controlador del agua filtrada. Si no se tuviera este dispositivo, el operador se dará cuenta de que la tasa de filtración disminuye gradualmente. Para mantener el mismo caudal de agua filtrada, tendrá que abrir la válvula reguladora cada vez más hasta el punto en que no se llegue al caudal original. Este fenómeno (que se denomina "carrera del filtro dinámico") tomará mucho tiempo pero cuando se llega a esa condición, la limpieza es obligatoria. Esta carrera es mucho más larga que la carrera de un FLA convencional. Probablemente será un fenómeno relacionado con las estaciones, ya que este problema tendrá lugar durante la época de lluvias, cuando el agua es más turbia. Se prevé que esta limpieza será necesaria una vez al año.

2.1 Limpieza diaria del filtro

El procedimiento para la limpieza diaria del filtro es el siguiente:

2.1.1 El operador debe cerrar la válvula de salida del agua filtrada (con la válvula de cierre y no con la válvula de regulación). No se debe tocar el caudal de entrada. Es importante dejar que el flujo cruzado expulse las impurezas. La única diferencia entre ese procedimiento y la operación normal es que en este momento el filtro no filtra el agua.

2.1.2 El operador removerá suavemente la superficie del filtro con un rastrillo de madera para restregar las capas superiores de arena (sin llegar a más de 5 cm de la superficie).

2.1.3 Debe empezar en la parte más cercana a la cámara de disipación y terminar en la parte más cercana a la cámara de recuperación de arena.

2.1.4 Durante esta actividad, la acumulación de lodo se moverá desde la entrada hacia el final del filtro y la mayor parte pasará sobre la cámara de recuperación de arena. El operador deberá restregar esta última parte del filtro cuidadosamente para evitar que pase demasiada arena sobre el vertedero de control del nivel.

2.1.5 Si bien existe una cámara de recuperación cuya función es retener la arena que se escapa, se recomienda evitar la pérdida excesiva de arena ya que se tendría que recuperar, lavar y volver a colocar en la superficie del filtro demasiado frecuentemente.

2.1.6 Cuando el filtro esté limpio, el operador deberá abrir la válvula de agua filtrada y recomenzar la operación del filtro.

2.1.7 Es probable que la operación de limpieza se haga en dos, tres o más días, según las características del agua y la operación del filtro. Sin embargo, se recomienda que el operador lo haga diariamente. Un cronograma menos estricto es posible solo si las condiciones específicas de funcionamiento del filtro lo permiten.

2.1.8 Cuando se empiece a acumular demasiada arena en la cámara de recuperación de arena (no hay un parámetro fijo para esto), se deberá drenar la cámara y recolectar la arena. Cuando la arena esté limpia, se volverá a colocar inmediatamente en el filtro. Si está sucia, se deberá aplicar algún procedimiento como el lavado con agua filtrada.

Este procedimiento dependerá de las condiciones locales, del comportamiento del filtro y del diseño del ingeniero.

2.2 Limpieza estacional

La limpieza estacional es mucho más importante y demanda más tiempo. Se recomiendan los siguientes pasos:

2.2.1 El filtro se interrumpe, se cierra el flujo cruzado de entrada y se drena la caja.

2.2.2 Con una pala se debe retirar aproximadamente 20 cm de arena de las capas superiores a lo largo de toda la superficie del filtro.

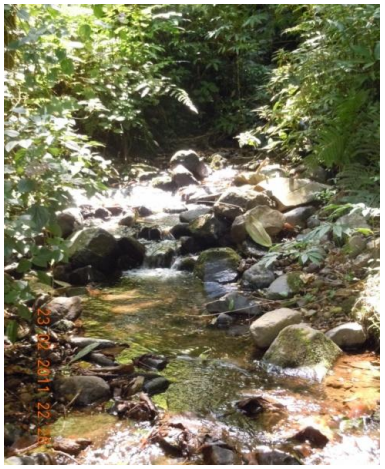
2.2.3 La arena sucia se sustituye por una nueva y limpia o se lava y se vuelve a colocar en el filtro. Si bien esta operación también es muy simple, demandará uno o dos días para completarse y para que el filtro vuelva a funcionar nuevamente.

Esto equivale a la limpieza de un FLA convencional. Sin embargo, en este caso se realiza con mucho menos frecuencia.

La OPS/CEPIS recomienda usar el método de trinchera. Es decir, junto con la capa de arena sucia también se debe retirar la otra capa más profunda que puede estar semicolmatada. Al reponer la arena, se coloca la arena limpia o nueva debajo de la semicolmatada que se queda en la parte superior del lecho. Si bien esto es más trabajoso (y normalmente no se hace), es lo correcto y asegura el funcionamiento perfecto del filtro.

Anexo 7

Anexo Fotográfico



Figuras A.7.1 y A.7.2. Quebrada El Yugo en época seca (izq) y en época lluviosa (der). Figura. A.7.3. Toma de la quebrada El Yugo.

Figura A.7.4. Entrada a la captación de la naciente.

Figura A.7.5. Inmediaciones de la captación de la naciente.

Figuras A.7.6 a A.7.9. Captación de la naciente y barrera de seguridad.

Figuras A.7.10 a A.7.12. Puente hacia los desarenadores; alrededores de los desarenadores (río a la der) y Cámara de entrada y zonas de sedimentación paralelas.

Figura A.7.13. Tubería original (izq) y tubería actual (der).

Figura A.7.14. Rejillas en las zonas de sedimentación.

Figura A.7.15. Compuerta de desarenadores.

Figura A.7.15.Zona de salida de los desarenadores.

Figura A.7.16.Rejillas y tubería de salida de los desarenadores.

Figura A.7.17. Fondo de los desarenadores.

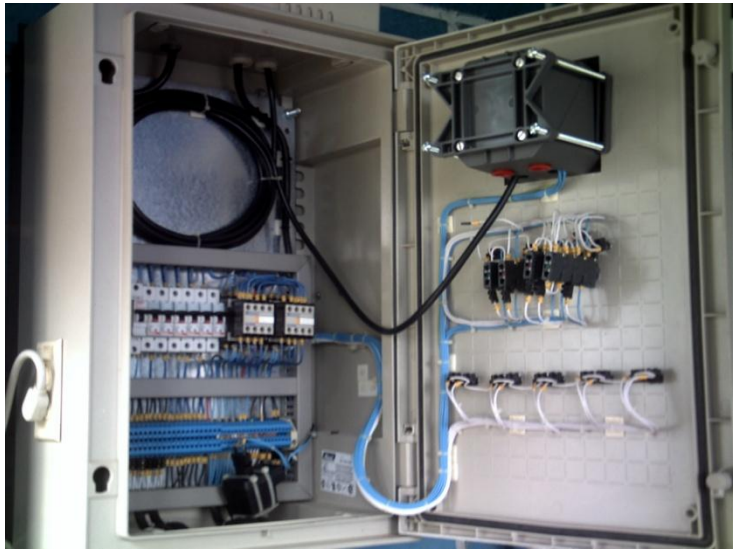
Figura A.7.18. Tubería de conducción.

Figura A.7.19.Conexión con codo en la tubería de conducción

Figuras A.7.20 y A.7.21.Tubería de caudal de entrada a la planta y válvula de regulación manual de caudal y detalle de la figura anterior: tubería izquierda gris transporta el caudal de alimentación del sistema de medición de turbiedad, tubería central de alimentación principal, tubería plateada derecha alimenta el área de lavado de arena.

Figura A.7.22. Entrada del agua al sifón.

Figura A.7.23. Lector automático de turbiedad alimentado por el efluente del sifón.



Figuras A.7.24 y A.7.25. Panel de control del sistema de entrada del caudal a la planta y batería de suministro eléctrico.

Figuras A.7.26 a A.7.28. Pantalla digital de la lectura de turbiedad; válvula automática de control de alimentación a la planta y control del modo de operación y de las válvulas automáticas.

Figura A.7.27. Panel de control del estado o situación de las válvulas automáticas del sistema.

Figura A.7.28. Válvulas manuales.

Figura A.7.29. Tapas del sistema de válvulas.

Figura A.7.30. Cámara de entrada y vertedero.

Figura A.7.31. Entrada caudal a la FLA.

Figura A.7.32. Entrada del afluente y alimentación a los FLA.

Figura A.7.33. Cierre de compuerta del FLA.

Figura A.7.34. Solera a la entrada de los FLA.

Figura A.7.35. Sistema paralelo de filtración lenta.

Figuras A.7.35 y A.7.36. Salidas del caudal de rebose (1 y 2), Salida superficial para la limpieza (3).

Figuras A.7.37. Descarte de aguas (salidas 1, 2 y 3 fig.ant). Figura A.7.38. Área de lavado de arena. Figura A.7.39. Canaletas colectoras de agua filtrada.

Figura A.7.40 Casetilla de cloración y tanque de contacto.

Figuras A.7.41 a A.7.43. Panel de control de cloración por electrólisis, electrodo y estañones con disolución de cloro.

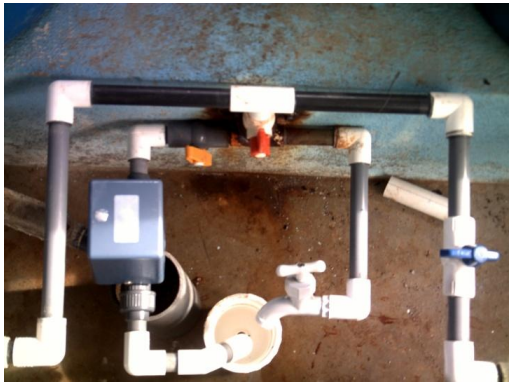


Figura A.7.44. Sistema de dosificación de cloro.

Figura A.7.45. Instalación eléctrica en la casetilla de cloración.

Figura A.7.46. Afluente del tanque de contacto.

Figura A.7.47. Tapa del acceso al tanque de cloración y detalle.

Figuras A.7.48 a A.7.51. Tanques de almacenamiento a lo largo del sistema de distribución.

Figura A.7.52. Casa de reuniones y bodega.

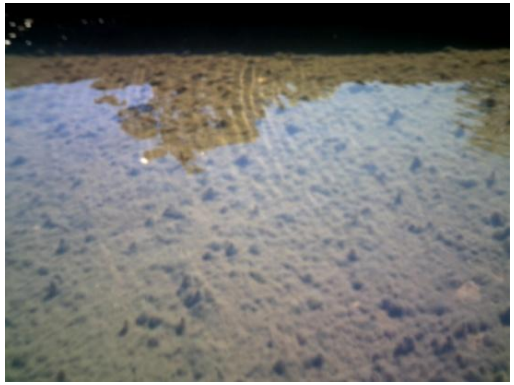


Figura A.7.53. Fenómeno “bloom” en los FLA.

Figuras A.7.54 y A.7.55. Cambio en la tubería de las canaletas colectoras de agua filtrada.

Figura A.7.56. Nuevos tanques de almacenamiento.

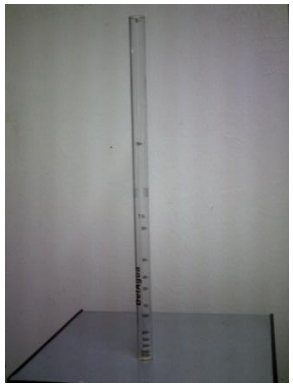
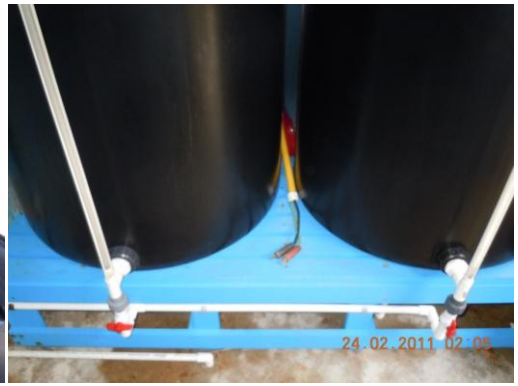


Figura A.7.57. Kit HACH para determinar cloro libre y total. Figura A.7.58. Turbidímetro de columna Kit OXFAM DELAGUA. Figura A.7.59. Medidor de pH OAKTON.



Figuras A.7.60 a A.7.62. Panel de control del nuevo sistema de cloración *in situ* Easy Clor; tanques nuevos para la preparación de disolución de cloro; y sistema de tuberías de salida y punto de dosificación en el tanque de cloración.

Figura A.7.63. Bomba dosificadora de cloro.

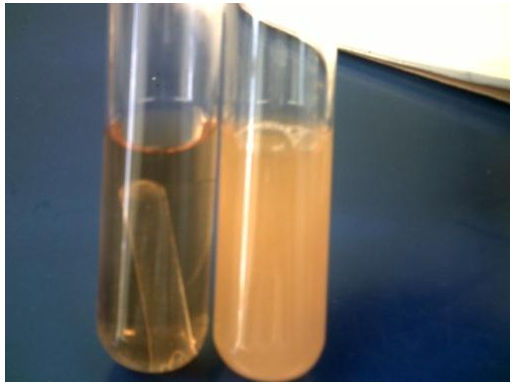


Figura A.7.64. Tubo - (izq) y + (der) para el grupo coliforme.

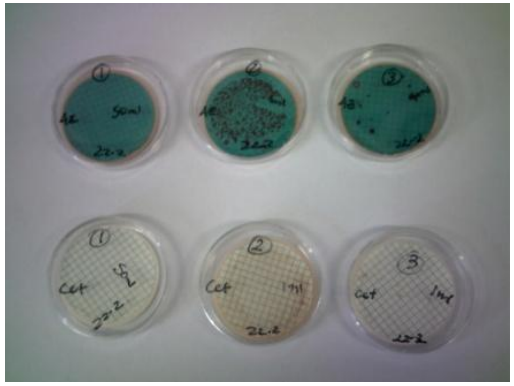


Figura A.7.65. Pseudomonas yEnterococos.

Figuras A.7.66 a A.7.71. Tanques de almacenamiento de agua domiciliar en condiciones no sanitarias.

Figuras A.7.72 a A.7.76. Limpieza del desarenador.

Figuras A.7.77 a A.7.80. Crecimiento de algas y biopelículas sobre el vertedero y en las cámaras de entrada de fluído a la planta y a los FLA.

Figuras A.7.81 y A.7.82. Desagüe y musgo en el área de lavado de arena. Figura A.7.83.Sistema en paro por alta turbiedad. Figura A.7.84. Material sobrenadante.

Figuras A.7.85 a A.7.89. Proceso de limpieza de los FLA: filtro en proceso de vaciado; remoción de la capa biológica; rearenado, distribución de la arena y emparejado de la superficie del FLA.

Figura A.7.90. Biofilm sobre las paredes de la canaleta. Figura A.7.91. Lavado de la canaleta colectora de agua filtrada. Figura A.7.92. Canaleta limpia.

Figura A.7.93. Desacomodo de arena por llenado inadecuado.

Figura A.7.94. Llave de paso corroída.

Figura A.7.95. Llaves de medidores de consumo domiciliar.

Figuras A.7.96 y A.7.97. Agua y tierra que obstaculizan la lectura de los medidores.

Figura A.7.98. Lectura de un medidor instalado en alto.

Figuras A.7.99 y A.7.100. Maleza sobre medidores de consumo.

Figuras A.7.101 y A.7.102. Hormiguero y araña en los medidores.

Figura A.7.103. Desprendimiento de taludes en la planta potabilizadora.